



TITLE:

地すべりの物理化学的調査と対策に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

富田, 武満

CITATION:

富田, 武満. 地すべりの物理化学的調査と対策に関する研究. 京都大学, 1982, 工学博士

ISSUE DATE:

1982-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r4691>

RIGHT:

地すべりの物理化学的調査と
対策に関する研究

昭和 56 年 11 月

富 田 武 満

目 次

第1章 序 論	4
1.1 研究の背景	4
1.2 地すべりの定義	4
1.3 地すべりの分類	5
1.4 地すべり地の分布	6
1.5 地すべりの予知	9
1.5.1 地形的特性からの予知	10
1.5.2 地表踏査に基づく予知	11
1.5.3 計測調査に基づく予知	11
1.6 地すべりの対策	12
1.7 本研究の内容	13
1.7.1 本研究の目的	13
1.7.2 本論文の構成	14
参考文献	15
第2章 斜面の表面応力測定による予知法	16
2.1 概 説	16
2.2 原理および測定器具	16
2.3 測定結果と考察	17
2.4 結 論	21
参考文献	22
第3章 地すべり斜面構成土の物理化学的特性	23
3.1 地すべり地の概要	23
3.2 鉱物分析	25
3.2.1 定性分析法	25
(1) 試料調整, 実験条件および測定誤差	25
(2) 分 析 法	26
(3) 実験結果と考察	26
3.2.2 定量分析	28
(1) 原 理	28
(2) 標準試料と測定法	30
(3) 実験結果と考察	31
3.3 化学組成分析	39
3.3.1 原理と装置	39
(1) 原 理	39
(2) 装 置	39
3.3.2 分 析 法	42
(1) 定量分析法	42

(2) 試料調整, 標準試料および実験方法	43
(3) 測定誤差	44
(4) 実験結果と考察	45
3.4 ノルム計算	62
3.4.1 原 理	62
3.4.2 計算結果と考察	62
3.5 イオン交換特性	66
3.5.1 目 的	66
3.5.2 試料調整と実験方法	66
3.5.3 実験結果と考察	67
3.6 強熱減量	69
3.6.1 原 理	69
3.6.2 実験方法	69
3.6.3 結果および考察	70
3.7 結 論	71
参考文献	72

第4章 地すべり粘土の物理化学的安定処理法	73
4.1 カリウム固定法	73
4.1.1 固定反応	73
4.1.2 K-固定に関する過去の研究	73
4.1.3 K-固定量に及ぼす各種の影響	75
(1) 含水状態	75
(2) 水素イオン濃度	75
(3) 塩基の影響	78
(4) アニオンの影響	81
4.1.4 K-固定による物理化学的特性の変化	81
(1) K-固定量と塩基置換容量	81
(2) K-固定による粘土構造の変化	81
(3) 比表面積	84
(4) ま と め	86
4.1.5 工学的諸特性の変化	86
(1) 粒度特性	86
(2) 膨潤特性	86
(3) アッターベルグ限界	88
(4) 締め固め及び一軸圧縮強度	88
(5) 圧密及び透水性	89
4.1.6 結 語	90
4.2 イオン交換工法	90
4.2.1 イオン交換と吸着	90
(1) イオン交換の重要度	91
(2) イオン交換現象	91

4.2.2	粘土の工学的特性に及ぼす吸着イオンの影響	94
(1)	試料の調整法と試験方法	94
(2)	工学的特性	95
4.2.3	結 語	106
4.3	結 論	106
	参考文献	107
第5章	物理化学的安定工法の実施例	109
5.1	生駒山地すべり安定工法	109
5.1.1	地すべりの概要	109
5.1.2	斜面構成土の吸着イオン特性	111
5.1.3	斜面構成土のコンシステンシー	112
5.1.4	施工後の効果の確認	114
(1)	地下水の調査	114
(2)	イオン交換能力の測定	115
(3)	石灰安定処理効果の追跡	117
5.1.5	ま と め	120
5.2	三田地すべり安定工法	121
5.2.1	地すべり地の概要	121
5.2.2	物理化学的調査	121
(1)	鉱物組成	121
(2)	吸着イオンとC.E.C.	122
5.2.3	イオン交換工法の施工	122
5.2.4	施工後の効果の確認	123
5.3	結 論	124
	参考文献	125
第6章	結 論	126
	謝 辞	128
	付 図	129

第1章 序 論

1.1 研究の背景

我が国のように山地の多い国では、人間生活の場が斜面とかかわり合いをもつことが多く、地すべり、山崩れ、崖崩れ、土砂崩壊などの自然災害による大きな被害を受けやすい。元来、降雨、融雪、地震などの自然営力的な誘因で多くの災害が発生しているが今日のように、人間の生活の場が拡大し、国土開発が進むにつれて災害の規模、様相も変化し、斜面の安定対策にも複雑な問題が数多く出てきている。斜面崩壊の主な現象はすべて我々の目では見られない斜面内部で生じており、それは自然営力に基づくものであるので、人間の力でそれを自由にコントロールすることはできない。従って、斜面崩壊が斜面災害にならぬよう人間の側でいかに回避していくかを考えねばならない。それには斜面崩壊の発生機構を明らかにし、発生予測を的確に行ない、適正な対策を行なわなければならない。

特に我が国のように、造山運動に伴う地質構成が極めて複雑な、地質年代の新しい岩質では固結度が低く、破碎の程度は大である。特に我が国に多く分布している第3紀層の泥岩や頁岩は水にあうと吸水膨張をきたし、その支持力が著しく低下して種々の問題を引き起している。各地にみられる第3紀層地すべりは、その不安定要因が構成している岩質の弱さに基づいているといつてよいだろう。^{1),2)}このような地すべり地帯には、長年月にわたる自然営力と風化作用の受けやすさなどの地質的特性によって、地すべり発生の素因になる界面活性度の非常に高い粘土鉱物が、多量に形成されていることが知られている。更に、すべり面付近に特徴的に見い出される粘土は、すべり面粘土と称されており、筆者の観察したものは5mm程度の薄層であった。このような薄層を通常のサンプリング技術でもって採取することはほとんど不可能であり、すべり面を含めて取り扱うとき、ブロックサンプリングというような時間と費用の要する手段が必要であるという指摘も³⁾されている。

更に地すべり安定工法あるいは崩壊防止工法は自然の莫大なエネルギーに対し、力でもって抗す方法すなわち間接的な抑止工が採用されている。従ってその対策に要する費用は莫大なものである。地すべりは多かれ少なかれ、すべり面を境にして滑動している事が多い事から、直接的な安定工法としてすべり面粘土の安定化という土質安定の立場からの対策工が最も安価で効果的と予測できるにも関わらず、この面の研究がエアポケットとなっている。

本研究においては、地すべりの予知（場所）と対策を物理化学的な見地から考察を行うと共に、直接的にすべり面粘土の安定化による対策工を追求するものである。

1.2 地すべりの定義^{4) 5)}

地すべりと崩壊の二現象は、それらの発生の機構に関しては大筋では大差ないとみてもよい。上記の二現象の定義は人により必ずしも同一でなく、種々の定義がなされている。地すべり等防止法では「地すべりとは土地の一部が地下水等に起因してすべる現象、またはこれに伴って移動する現象をいう」と定義し、主体をなす土塊の滑動現象のほか、これに伴って発生する崩壊現象をも加えて地すべりと呼び、これを広義に規定している。

地すべりと崩壊との相違は、運動形態・発生機構の両方に認められ、前者は滑動土塊が原形を保ち、緩慢である程度永続性と再発性のあるものをいう。後者は滑動土塊が著しく破碎され、多くの場合に、突発的で急速運動で、一旦移動した後はほぼ安定する。

6) なお、山田らはこれら二現象の相違を表 1.1 の如く、多くの項目を挙げて比較している。

表-1.1 地すべりと崩壊の相違

	地 す べ り	崩 壊
①地 質	特定の地質または地質構造の所に多く発生する。	地質との関連は地すべりに比べて少ない。
②土 質	主として粘性土をすべり面として滑動する。	主として地山中の不連続面（表土と下層の境界面であることが多い）を境として滑動する。
③地 形	5°～20°の緩傾斜面に多く発生し、特に上部台形状の地形をもつ場合が多い。	20°以上の急傾斜地に多く発生する。
④活動状況	継続性、再発性	突 発 性
⑤移動速度	0.01～10mm/日のものが多く、一般に速度は小さい。	10mm/日以上で速度は極めて大きい。
⑥土 塊	土塊の乱れは少なく、原形を保ちつつ動く場合が多い。	土塊は攪乱される。
⑦誘 因	地下水による影響が大きい。	降雨、特に降雨強度に影響される。
⑧厚さ、規模	平均的な厚さは20m、1～100haで規模が大きい。	平均的な厚さは2m。規模が小さい。
⑨徴 候	発生前にキレツの発生、陥没、隆起、地下水の変動など生ずる。	徴候の発生が少なく、突発的に滑落する。

また、地すべりの場合には、一般にその共通因子として「粘土」が広く分布しており、これが地下水の作用を受けると、その強度が著しく低下するとともに、間げき水圧が増大するため、粘土中でセン断破壊を生じ、地すべりが誘発されることになる。したがって、地すべりは、「斜面の内部に分布、あるいは生成された地すべり粘土のセン断破壊によって惹起される滑落現象」とも定義づけられる。

基本的には、地すべりと崩壊⁷⁾の区別は、言語学的あるいは国語辞典上での問題のように思われる。すなわち、広辞苑で「すべる」という言葉を調べてみると、「物の上をなめらかに移行する」、「物の間を滞りなく通る」とある。一方、「崩壊」という言葉は「くづれこわれること」となっている。従って、全然別の現象である両者について無理にその差異を科学的に立証する事は無意味である。

地すべりと崩壊の定義については、言語学的な意味でのものが最も適当と思われるので、次のように定義しておきたい。「地すべりとは土地がなめらかに移動すること」であり、「崩壊とは土地がくだけ落ちること」とであるといえる。

1.3 地すべりの分類

地すべりの分類は種々の観点から種々の人によって試みられてきた。以下に、一般的な分類である「地質による分類」、「運動様式による分類」、「形態による分類」について示す。

地質による分類は小出が第三紀層地すべり、破碎帯地すべり、温泉地すべりの3種の分類を行ない、藤原がそれらを補足するものとして、中～古生層地すべり、火山碎層物地すべり、花崗岩型地すべりの3種を加えて6分類とした。⁸⁾

地すべりの運動様式による分類としては、谷口が円弧型すべり、平面型すべり、匍行型¹⁰⁾

すべりの3種に区分している。

次に、地すべりの形態による分類としては、高野が¹¹⁾地塊型地すべり、崩壊型地すべり、粘稠型地すべり、流動型地すべりの4種に区分している。

わが国の地すべりは上記のように、一応の区分がなされているが、種々の組み合わせにより地すべりが発生しており、明確には分類できない場合が多い。

1.4 地すべり地の分布

日本の地すべりの分布は、Landslide in Japan (1972)をはじめ、建設省砂防課による「日本の地すべり分布図」(1964)等によって図-1.1図-1.2のようになる¹²⁾。特に、日本の地すべりは地質構造と密接な関連を持っている。上図の分布図にもとずいて地質別に考えると次のとおりである。

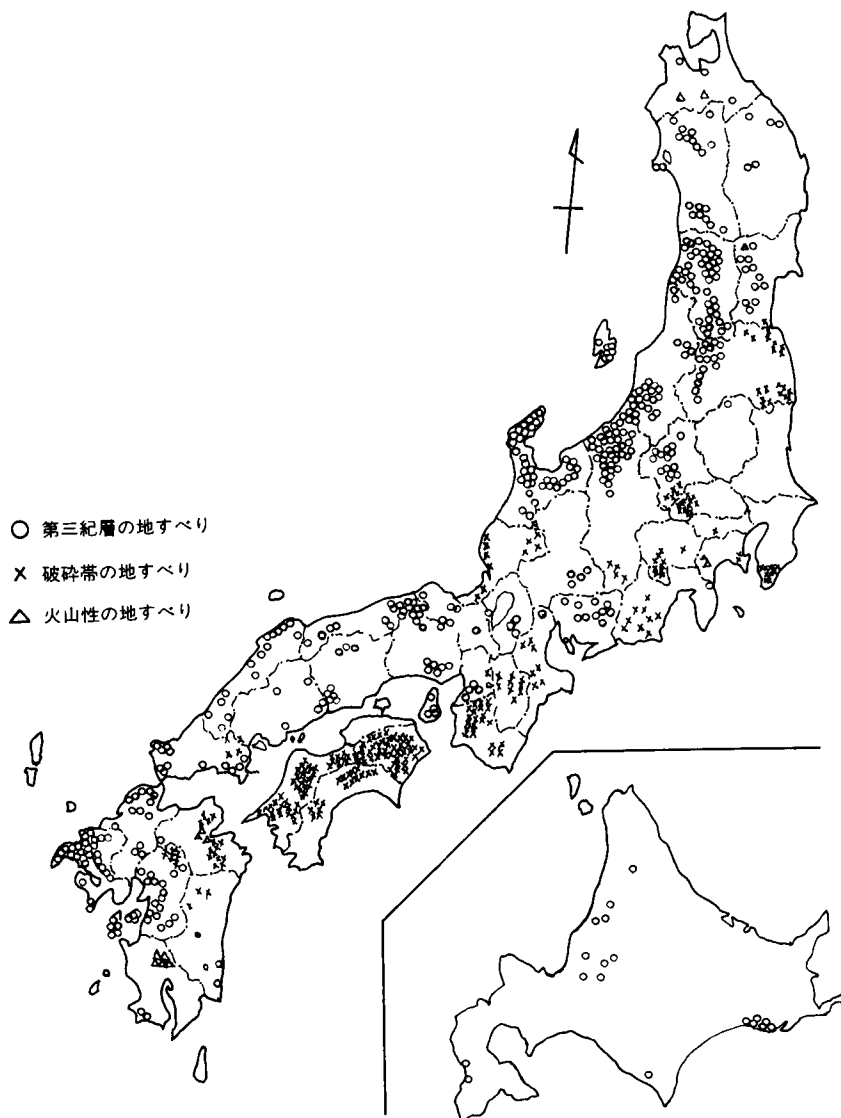


図-1.1 地すべり分布図 (建設省砂防課による)

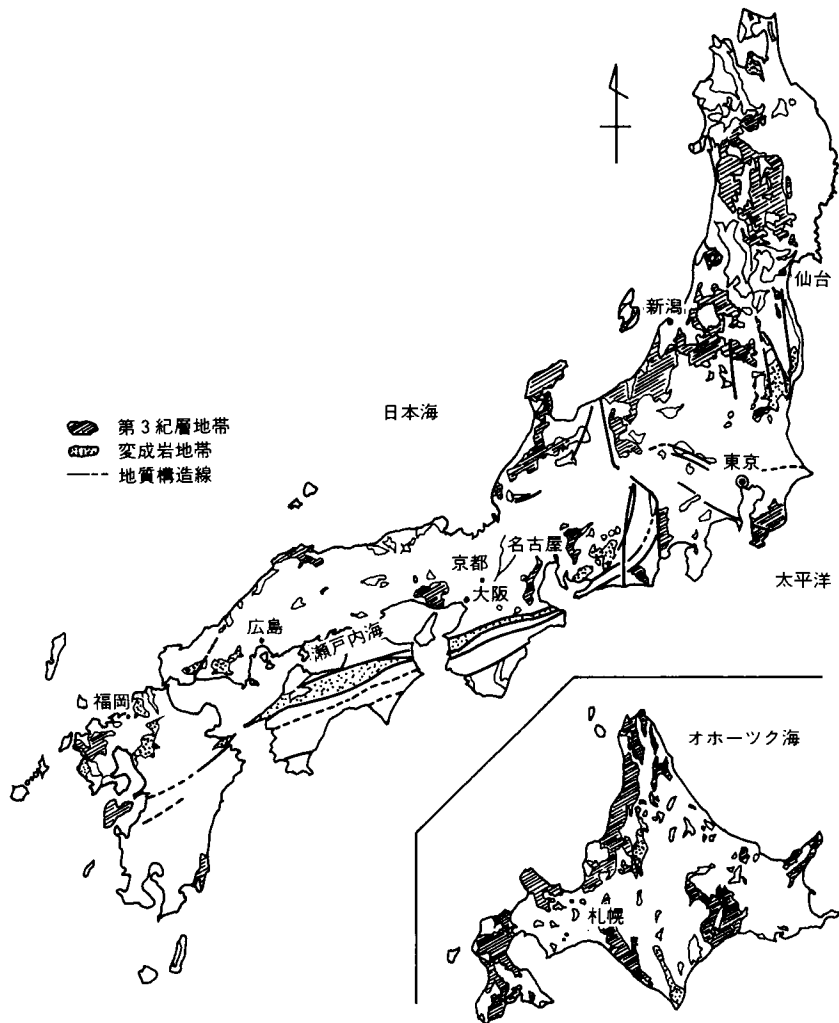


図-1.2 日本の地質構造

① 新第三紀層中のもの¹³⁾

主として、中新世の黒色泥岩、凝灰岩地帯に発生し、裏日本のグリーンタフ地帯に集中するものが多いが、表日本でも中央構造線北側（内帯）にはある程度分布している。すべり土塊は火山砕屑物から成っているものも多い。

② 古第三紀層中のもの

主として、構造線の影響によるものが多く、北海道日高構造線に沿って分布するもの等が代表的である。

③ 変成岩地帯のもの

中生層の地すべりは、大部分この中に発生し、緑色片岩、泥質変岩に多くが集中している。中央構造線南側（外帯）に分布するものが多く、特に御荷鉾破碎帯中に集中している。

④ 変質岩地帯のもの

一般に火山性地すべりと定義されているものは、わが国の主な火山地帯に集中している。溶岩や安山岩の中で起こるものと、第三紀層が後火成作用によって変質してすべるものがある。

次に地方別にその分布をみると次のとおりである。

① 北海道

日高構造線に沿ったものの大部分は西側の炭鉱地帯に分布している。また、火山性地すべりが登別洞爺湖周辺等に多く分布している。

② 東北地方

奥羽脊梁山脈の西側はグリーンタフ地帯に属し、秋田県阿仁地区や由利、雄勝郡、男鹿半島に比較的多い。

山形県では最上川左岸流域の月山周辺と米沢小国盆地周辺地区に分布し、特に月山周辺地区ではシラス、火山碎屑物が地すべり土塊を形成している例が多い。

福島県は西会津地方の緑色凝灰岩地帯に最も多く、次に東の海岸地帯に炭層の地すべりがみられる。

宮城県には鳴子温泉付近の火山性地すべり群がある。

青森県では浅虫の火山性地すべりと津軽半島西岸の新第三紀層に分布している。

岩手県は県北の県境付近と久慈地区に数カ所ずつ地すべりが集まり、また県南の焼石岳南麓では、その火砕物が新第三紀層の上ののってすべっている。

③ 北陸地方

わが国の代表的な地すべり地帯で、新潟県では、上越、中越地区の黒色泥岩地帯に最も多く、その密度はわが国で最高である。阿賀野川中流部に緑色凝灰岩中の地すべり群、糸魚川地区にフォッサマグナの影響による地すべり群がある。

富山県では能登半島基部に凝灰岩中に発生する大規模な地すべり群があり、これは石川県にまで連続して分布する。

福井県では九頭竜川中流部と武生付近の海岸の中古生層の地すべりがみられる。

長野県では長野市西部の犀川流域に新第三紀層の地すべりが集中しているのと、天竜川中流左岸流域に変成岩の地すべりがある。

④ 関東中部地方

群馬県には、碓氷、吾妻川流域に新第三紀の地すべり群があり、さらに神流川流域では埼玉県にかけて三波川、御荷鉾帯の中に結晶片岩の地すべりが集中している。

埼玉県では前記のもの以外に荒川上流部の粘板岩の地すべり地帯がある。

千葉県では、房総半島南端の鴨川付近、神奈川県は三浦半島中部の逗子、葉山付近にも構造線の影響による新第三紀層中の地すべりが集まっている。

山梨県では、フォッサマグナの東側の新第三紀層中に多く分布し、富士川中流右岸地域で、静岡県との由比付近まで連続している。

静岡県では、このほかに大井川右岸金谷地区の牧の原台地周辺に新第三紀泥岩の地すべりが、また県北の森町付近に三原層の地すべりがある。愛知、岐阜地域では知多半島と土岐市周辺にある。

⑤ 近畿中国地方

滋賀県には琵琶湖周辺（西岸）に湖成層の地すべりがあるが、一般に浅いすべりである。

大阪、奈良の県境生駒山系、二上山系には凝灰岩中に発生する大規模なものがみられ、その代表的なものとして亀の瀬地すべりが有名である。

紀ノ川流域では、その中流部、上流部に、また和歌山県有田川、日高川、三重県櫛田川流域には、中央構造線に沿う変成岩の地すべりが多い。

兵庫県には六甲地区の表と裏に新第三紀層の神戸層群中に発生する地すべりが多く分布している。本研究においては、主にこの地すべりをとりあげている。また、日本海沿岸浜坂地区に鳥取県にまたがって多く分布している。

岡山県の津山盆地と香川県の瀬戸内海の島の一部に第三紀層の地すべり（瀬戸内式と呼ばれる）があり、また岡山県西部から広島県にかけて三郡変成岩の地すべりがある。

山口県では瀬戸内海沿岸の柳井、徳山付近と日本海岸の油谷半島に多く、島根県でも出雲半島に多く分布している。

鳥取県では米子市周辺の新第三紀層と中国脊梁山脈中に石英粗面岩中の地すべりがみられる。

⑥ 四国地方

徳島県では吉野川北岸の和泉砂岩層中のもの、鮎喰川流域から祖谷川流域にかけての御荷鉾帯、点紋、無点紋結晶片岩中に多く分布している。

愛媛県では佐田岬および仁淀川の上中流部に、高知県にまたがって、また、高知県では吉野川上流部に主として緑泥片岩、石墨片岩中に多数発生している。

⑦ 九州地方

最も有名なものは長崎県北部から佐賀県にかけての第三紀層中新世の爽炭層の地すべりで、上部に玄武岩をのせた特異なもので北松型と呼ばれている。

このほか、長崎県と熊本県天草島にかけては地質構造上長崎三角地帯と呼ばれ、変成岩地帯（絹雲母片岩、滑石片岩を主とするものが多い）と新第三紀層の中で多くが発生している。

また佐賀県では東部に三郡変成岩中の地すべりもある。

筑後川上流地域には、大分、熊本両県にかけては、火山碎屑物が基盤の変質した安山岩や、石英粗面岩をすべり面としてすべっている例がある。

大分県の別府、鹿児島県の霧島には、温泉余土による火山性地すべりが分布している。

また、宮崎県の南部海岸には中新世の頁岩中に発生する地すべりが並んでいる。

以上をまとめて建設省所管地すべり防止区域数と整備率を表-1・2に示す。¹⁴⁾

表-1・2 建設省所管地すべり防止区域指定率、整備率（昭54・3現在）

区 分	全体危険箇所		既 指 定		整備箇所数	指 定 率 (箇所)	整 備 率 (箇所)
	個 所 数	面 積	個 所 数	面 積			
建設省	5,616	150,000ha	2,449	84,076ha	750	43.6%	13.4%

1.5 地すべりの予知

地すべり又は斜面崩壊については、この発生と、これによって生ずる被害は分けて考える必要がある。なぜなら、このような現象の発生を抑止して、被害を防止することが可能

であれば、これにこした対策はないが、たとえ、その発生が止められなかったとしても、起こるべき被害を軽減することができれば、対策として十分価値がある。

したがって、地すべり災害の防止を考える場合、予報による避難措置と防止工事による措置の二つに分けて検討する必要がある。

第1の避難対策の場合には、事前にこれらの現象を正しく予知することが必要である。地すべりの予知は地震等の場合と同様に、いつ、どこで、どの程度のものが発生するかを知らねばならない。すなわち、これらの発生する場所と時間と規模の三つの要素が正確に把握されてはじめて、予知が可能になる。現時点での学問的成果をもとにして、この3要素がどの程度まで予知可能であるか検討する必要がある。まず場所の問題であるが、地すべりの起る場所は今までの研究と経験からかなり明確に知りうる。これは地すべりが特異な地質条件をそなえた地域で起ることと、反復して発生する性質が地形的な特徴に明瞭に表われるからである。

すぐれた航空写真の判読力と地質の専門知識をもつ技術者であれば、写真から得た知識と現地を詳細に踏査することによって、かなりの精度で地すべり地域を限定することが可能である。場所の限定ができれば、同時にその起るべき範囲の想定ができ、その規模の概略は知ることができる。したがって、問題は発生する時期の把握にある。これを完全に行うことは非常に困難であるが、ある程度の調査が可能ならば、不完全ながらも予測することができる。

地すべりはその運動自身が非常に緩慢であることから、大きな地すべり移動の前には必ず前駆的現象が現われるもので、この事前の現象を何らかの方法で解析することによって危険な時期の予測は可能といえる。現在その手段として、地盤傾斜計による地表面の傾斜変動量あるいは伸縮計による地表の伸縮量、または地中に設置した計測器による地中ヒズミ量などの観測¹⁵⁾によったデータをもとにして発生^{16), 17)}の時期の推定が行なわれている。例えば、齊藤は地表面のヒズミ速度の解析から、国鉄飯山線の高場山トンネルの地すべりや東北本線浅虫の地すべりで極めて良い結果を得ている。このように、地すべりの前駆的現象を種々の計器の開発により、全ゆる方面からとらえる事ができれば、更に精度の高い地すべり発生時刻の予知が可能であろう。なお、種々の予知方法については以下に述べる。

1.5.1 地形的特性からの予知

地すべり地は一般にある共通の地形的特性を有し、いわゆる「地すべり地形」と呼ばれる特徴を示している。したがって、この地形的特性を地形図等から判読すれば、ある程度の予知は可能である。

地すべり地形の発生は、地すべりが特異な地質条件をそなえた地域で起ることと、反復して発生するという性質から生ずるものである。藤原によると、凸状尾根型、凸状台地型、凹状単丘型、凹状多丘型の地形が調査対象地区に存在するか否かを判読すれば良い。いわゆる典型的な地すべり地では、等高線の不整配列、馬蹄形状急崖、台地状緩斜面、緩斜面下方における等高線の緊密化、池・沼・湿地などの規則的な配列、急崖前面における不規則な等高線配列あるいは分離小丘の存在、小溪・沢などの異常なカーブ、千枚田（棚田）の存在など、これらのいずれかの現象が、地すべりの地形的特性として現われている。

したがって、これらの特徴を、航空写真・地形図から判読し、発生予知（発生の可能性）の検討を行ない、次の現地踏査により規模・時期などを把握すれば良い。

1.5.2 地表踏査に基づく予知

地すべり地の頭部における引張地帯では、馬蹄形状の滑落崖、あるいは急斜面から緩斜面に移行する明らかな地形変換点の存在が認められる。地すべりの中間部では、なだらかな斜面、あるいは階段状地形の連続、さらに地表面での陥没・隆起などを判読する。地すべり地の末端部の圧縮地帯では、末端部の隆起、あるいは緩斜面から急斜面への移行、さらに圧縮キレットなどを判断することによって地すべり機構の概略を把握することが可能であり、これらの判断に基づいて、すべり面の推定と、地すべりの変動を考察する。

また、古い地すべり地においては、表面の植生の動向をつぶさに調査する事によって、その規模と発生年を確定する事ができる。すなわち、移動を受けた樹木はある高さの点から屈曲しているので、その屈曲点から特殊な器具で木のサンプリングを行ない、年輪の「あて」部分を調査し、何年前に発生したものを明瞭に判定する事ができる。

1.5.3 計測調査に基づく予知

地盤傾斜計・伸縮計ならびにヒズミ計などによる計測調査は、調査の対象となる地すべり地が現状で安定しているか否かを判断する為に行なわれる。また、地すべり計等に斜面が移動していることが明らかになり、かつその移動量が増大していることが認められた場合、その斜面が大規模に崩壊するかどうか、崩壊時期はいつか、崩壊の規模はどの程度かについては各種の計測機器を用いて判断する。

(1) クリープ破壊^{(18), (19)}

ある一定の荷重を土に加えたままで放置しておくと、土の変形は時間の経過とともに大きくなるクリープ現象がある。その経過は図-1.3に示すように、荷重を加えた瞬間に弾性的な変形を示し、ある時期に定常クリープ

(ひづみ～時間関係が直線)領域があり、やがて変形量が次第に増加して破壊を生じるにいたる。これらの三つの領域はそれぞれ第1, 2, 3次クリープとよぶことがあり、クリープによる破壊は通常の強度試験で求めた値の約70%以上の荷重に対してみられる。そして荷重を加えてから破壊を生じるまでの時間は荷重が低いほど長くなる。

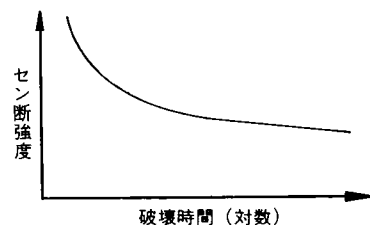


図-1.3

クリープ破壊時間の長短を支配する因子には種々のものが考えられるが、斉藤の研究によれば、定常クリープのひづみ速度（ひづみ～時間直線の傾斜）と密接な関係のあることがわかっている。種々の粘性土について、定常クリープ速度と破壊時間の関係を図上にプロットすると、どんな土でも図-1.4に示した点線の範囲内に収まってしまふ。この図は斉藤によって「クリープ破壊時間判定図」と呼ばれており、両者の関係が両対数上で45度の直線で表わされるので、式で示すと、

$$t_f \cdot \epsilon = 21.4 \quad (1.1)$$

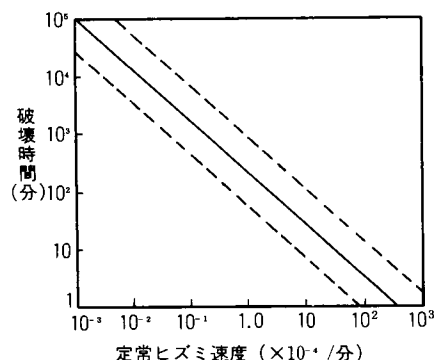


図-1.4

ここに t_b : クリープ破壊時間 (分), ϵ : 定常ひずみ速度 ($\times 10^{-4}$ /分) である。これは破壊時間が定常ひずみ速度に逆比例するものであって、土の $\dot{\epsilon}$ がわかれば破壊時間 t_b が推定でき、斜面崩壊の予知に応用できる。

一例として、昭和35年に大井川鉄道の本線で高い擁壁が倒壊したが、この箇所は事前に観測を行っていたので、移動の初めから崩壊にいたるまでの記録が得られている。移動記録によると、ひずみ速度は 5.8×10^{-7} /min であり、図-1・4の判定図あるいは式 (1.1) の関係より破壊時間を求めると、25.7日後と推定された。実際には24日であり、1日の誤差で予知できたのである。結論的には、斜面変状の初期には定常クリープから概略予測を、崩壊が近づいたときには第3次クリープから近接予測を行なうのがよい。

1.6 地すべりの対策

20),21)

斜面安定工法あるいは地すべり安定工法は大別すると、斜面保護工法と土性改良による斜面安定工法になる。斜面保護工法とは何らかの保護工を斜面に直接施行するもので、土性改良による斜面安定工法とは、主として土性を物理的または化学的に改良して斜面の安定を図るものである。この他に、構造物を造ってその重量などによって力学的に斜面を安定する工法もある。

上記の対策工を分類すると次のようになる。

- (1) 斜面保護工法
 - a. 植生工法
 - b. 人工材料による保護工法
 - i) 被覆工法
 - ii) 吹付工法
 - iii) ブロック工法
 - iv) 格子枠工法
 - v) 柵工法
 - vi) 蛇カゴ工法
- (2) 土性改良による安定工法
 - i) 排水工法
 - ii) 注入工法
 - iii) 焼結工法
 - iv) 電気化学的工法 (イオン交換工法)
 - v) 石灰処理工法
- (3) 構造物による力学的安定工法
 - i) クイ工法
 - ii) アンカー工法
 - iii) 補強土工法

上記の(1)の工法は斜面表層の肌落ち、侵食防止等の表面防護に関する工法であり、本論文の対象になる安定工法としては(2)、(3)の各工法になる。

(2)の土性改良工法は排水工法を除いて、比較的小規模の斜面安定工法として利用されてきたが、本来、地すべりのような莫大な運動エネルギーに対する安定工法としては、直接的にすべり面粘土の強化・改良を行なうことができることから、経済的で有効な工法といえる。従来からのこの種の工法の適用は、十分な調査によった合理的な設計を行なうこと

なく、すべり土塊全体を改良・固化する不経済な方法がとられてきた。従って、工法の適用を誤まらなければ、(3)のような間接的工法に比較して、安価な耐久性のある工法となり得る。以下に現在利用されている各工法の利害得失を示す。

i) 排水工法

斜面への降水や周辺部よりの流入表面水または地下浸透水を排除し、斜面の侵食防止、土中の間げき水圧や含水比の低下、地下水位低下によるすべり面粘土の膨潤圧の減少を図り、その安定を確保することを目的とするもので他の各種の工法と併用することが多い。地下水排除工は地すべり発生の誘因である水的作用を除去することはできるが、素因である地すべり粘土への対策が不十分な為に、他の抑止工との併用にならざるを得ない。

ii) 注入工法

セメント、砂、薬液等を注入し、斜面を強化する方法で、土砂から硬岩まで適用範囲は広い。しかし、静的な注入においては、注入薬液を所定の部位に浸透させることが困難なため、過剰の薬液を注入する傾向が多く、むしろ高価な対策工になり易い。一方、最近開発された噴射注入によれば、所定の深度および部位で固結体を形成する事ができるので、すべり面を含んだ土塊全体の強度増加には適した工法である。

iii) 焼結工法

加熱による土性改良を目的とする安定工法であるが、ある温度以上になると土が水分に非可逆的に反応することを利用したものである。経済的な加熱方法にはまだ問題があり、注入工法、凍結工法などの利用が不可能なときに用いられると共に、斜面安定工法としては実験的に行なわれているにすぎない。

iv) 電気化学的固結工法

土の電気化学的な性質を利用したり、土に電気化学的な操作を加え、斜面の防護や安定を図る工法で、土のイオン交換現象によるものと、外部から直流電流を印加して行なうものとがある。

イオン交換工法は、第3紀地すべりのように、すべり面粘土がモンモリロナイトからなっている場合に、有効な工法であり、本論文の第5章で詳しく述べる。

電気的方法では直流電流を使用するので、電蝕や安全管理が問題となることと、工費が高いことから一般的でなく、きわめて特殊なときに限定される。

v) 石灰処理工法

主として粘性土に消石灰または生石灰を加え、イオン交換作用、化学的結合作用などによりその土性を改良し斜面の安定を図るものである。生石灰を使用するときには、さらに消化による吸水作用、発熱作用および膨張作用が加わる。施工は斜面またはその付近に石灰クイを打設するのであるが、これについては第5章において論述する。

1.7 本研究の内容

1.7.1 本研究の目的

本研究は、すでに述べたように地すべり現象に関して、物理化学的な見地から解析することを目的としている。すなわち、地すべりの予知については、潜在的な地すべりと共に地盤内部の潜在的なすべり面の発見であり、地すべり対策については、すべり面粘土に着目してその改良・安定化を図ることである。

地すべりの予知はこれまで種々の方面からなされている。発生時期に関しては移動中の

地すべりの観測による齊藤の方法がほぼ確立しているが、現在休眠中であるが将来滑動しそうな斜面についてはその移動発生時期の予知は不可能である。地すべりの規模は地形学および地質学的調査によってある程度把握することができるが、移動土塊の厚さ及びすべり面の位置等に関しては現在の調査法では捉えきれない。そこで、ここでは地すべり粘土の基本的な特性としての物理化学的特性を機器分析、主として示差熱分析、×線回析、赤外線吸収スペクトル分析および原子吸光分析等で明らかにし、その安定処理法を追求し、実斜面でのイオン交換工法の実施と効果の確認を行なった。

1.7.2 本論文の構成

第1章においては、地すべり研究の現状と問題点を明らかにし、研究の欠落部分としての物理化学的なアプローチの必要性を明らかにしている。

第2章では人工的な切取斜面施工時の安定性を、地盤に孔をあけた直後の孔の変形を観測することによって地盤の応力状態を知り、斜面全体の応力分布特性を明らかにし、切取計画の施工管理に応用した結果を述べている。

第3章では神戸層群の切取で生じた地すべりを、物理化学的な観点から調査を行ない、すべり面粘土の特性を明らかにしている。また、将来すべり面が生じそうな土層についても示した。

第4章では、すべり面粘土の大部分を占めるモンモリロナイト系粘土の土質安定法として、イオン交換とカリウム固定法について、物理化学的、工学的特性を明らかにし、地すべり粘土の安定に効果のあることを示している。この結果を受けて、第5章では実際の地すべり斜面の安定工法としてイオン交換工法を施工した結果と、地すべり防護策としてイオン交換工法を施工した結果について述べている。上記のどちらの場合も経済的かつ有効な工法であることを立証することができた。

最後に6章として、本研究の成果と総括を行ない、今後の問題点および展望を明らかにしている。

＜参 考 文 献＞

- 1) 山田, 渡, 小橋: 地すべり・斜面崩壊の実態と対策, 山海堂, pp.14~28, 1971
- 2) 藤原明敏: 地すべりの解析と防止対策, 理工図書, pp.33~35, 1979
- 3) 藤田寿雄: 設計における土質定数の考え方, 3. 地すべり, 土と基礎, 26巻, 6号, pp.71~78, 1978
- 4) 田中 茂: 地すべり性山復崩壊の機構について, 土と基礎, 26巻, 6号, pp.9~10, 1978
- 5) 前出 1), pp.9~11
- 6) 前出 1), p.12
- 7) 高野秀夫: 地すべりと崩壊, 地すべり, Vol.16, No.2, p.34, 1979
- 8) 小出 博: 日本の地すべり, 東洋経済新報社, 1956
- 9) 藤原明敏: 地すべり調査と解析, 理工図書, 1970
- 10) 谷口敏雄: 地すべり調査と対策, 山海堂, 1963
- 11) 高野秀夫: 地すべりと防止工法, 地球出版, 1960
- 12) 川本 整: 日本の地すべりの分布についての一考察, 地すべり, Vol.12, No.1, 1975
- 13) 前出 1), pp.44~49
- 14) 安中敏夫: 地すべり, 急傾斜地対策—地すべりおよび急傾斜地崩壊対策事業の現状と課題—, 土木技術, Vol.34, No.8, 1979, pp.24~32
- 15) 齊藤迪孝: 斜面崩壊発生時期の予知に関する研究, 鉄道技術研究所報告, No.626, 1968
- 16) 藤原明敏: 地すべり斜面に対する考え方と調査計画の立案, 基礎工, Vol.4, No.3, 1976
- 17) 前出 2), pp.9~13
- 18) 前出 15)
- 19) 日本材料学会土質安定材料委員会編: 斜面安定工法〈指針と解説〉, 鹿島出版会, pp.63~68, 1971
- 20) 松尾新一郎, 富田武満: 斜面安定に及ぼすイオン交換の影響, 日本材料学会誌「材料」, Vol.19, No.205, pp.53~58, 1970
- 21) 前出 19), pp.85~88.

第2章 斜面の表面応力測定による予知法

2.1 概 説

自然あるいは人為的な斜面は常に崩壊、滑動の危険性を秘めている。その予知は難しく、斜面のキレツの発生、擁壁のはらみ出し、地下水の涸渇などの何らかの徴候を見出して初めてその対策にかかっているのが現状である。ところが、表面に徴候が表われた時には、すでに手遅れになっている。したがって、人間の身体でいえば、予防医学的な検査によって、その初期に対策を構ずることができれば、対策の費用も少なく、容易に行なえる。

また、我が国の代表的な地すべりである第3紀層すべりでは、非常に複雑な機構¹⁾を有している。すなわち、滑落崖に始まり、末端部に至るまでに、すべり発生部（引張領域）、抵抗地帯、クリープ域、陥没部分、盛り上り部分などが入り混ってさまざまなパターンを作っている。したがって、すべりが生ずるにしても単一の剛体がすべるという形でなく、連続破壊とか、伝播性破壊とかの複雑な過程を経過する。したがって地すべり発生の予測を行なうにしても、対策工事を計画するに当たっても、地すべり地内の応力分布、あるいは単一体と考えられる各ブロック間の力関係を十分に解明しなければならない。

更に、地殻の褶曲運動によって横方向の応力を持った岩盤や、過圧密を受けた粘土斜面等では、わずかの切取や侵食によって重大な結果を引き起すことが多い。この状態は斜面の切取によっても人工的に現出するものであり、この残留水平応力が斜面の土塊の抵抗力を上まわった時に崩壊及び地すべりが発生することになる。また、斜面下部の切取によって、斜面の頂部やその近傍に引張キレツが生じる。キレツの生じた処では水平力は生じないが、キレツのない処では引張応力が見られる。

斜面の全域にわたって、応力分布を測定するには莫大な経費と長期の観測を必要とするが、地盤に孔をあけた直後の孔の変形を観測⁵⁾して、地盤の応力状態を知る方法^{2),3),4)}が非常に簡便であり、信頼度が高いので、中国自動車道の六甲サービス・エリア付近の長大切取斜面において、応力分布を測定し、施工管理に応用した結果を示す。

2.2 原理及び測定器具

この調査方法はSachs⁶⁾によって、金属材料に対して行なわれた「物質の除去」の手法を応用している。これはひずみを受けている物体の応力場は物体の一部を除去すると変化するという事実に基づいている。したがって、初期応力状態が変形値と材料の変形定数から計算できる。

地表面に直径 a の孔を掘ったとき、その試掘孔の中心より r の距離のところが $\Delta\gamma$ だけ中心軸の方に動いたとすると、軸方向に働いている応力 σ は次のとおりになる。

$$\sigma = \frac{4\gamma \cdot \gamma \cdot E_m}{(1+\nu)a^2} \quad (2 \cdot 1)$$

ここに E_m は変形弾性係数、 ν はポアソン比である。変形が直角方向で異なっている場合（例えば等高線の方向と傾斜方向）、それぞれ $\Delta\gamma_1$ 、 $\Delta\gamma_2$ とすると、その方向の応力 σ_1 と σ_2 は次のように表わされる。

$$\Delta\gamma_1 = \frac{\sigma_1}{2Em} \frac{a^2}{\gamma} \left[5 + \nu - \frac{a^2}{\gamma^2} (1 - \nu) \right] + \frac{\sigma_2}{2Em} \frac{a^2}{\gamma} \left[-3 + \nu + \frac{a^2}{\gamma^2} (1 + \nu) \right] \quad (2 \cdot 2)$$

$$\Delta\gamma_2 = \frac{\sigma_1}{2Em} \frac{a^2}{\gamma} \left[-3 + \nu + \frac{a^2}{\gamma^2} (1 + \nu) \right] + \frac{\sigma_2}{2Em} \frac{a^2}{\gamma} \left[5 + \nu - \frac{a^2}{\gamma^2} (1 - \nu) \right] \quad (2 \cdot 3)$$

測定は宝塚市付近の中国道建設現場の切取り斜面で、切取りの施工管理に応用した。具体的には斜面の縦断方向約10m毎に、直径15cm深さ20cmの孔を手掘りし、孔の中心から16cm離れた点で土中に挿入した変位観測棒の変位をダイヤル・ゲージで読み取った。この場合掘削による応力の解放が、引張応力の場合、変位棒の孔の中心から外方へ、圧縮応力の場合、中心方向の変位として記録される（写真2.1参照）。



写真-2.1 測定器具

2.3 測定結果と考察

測定結果を表-2.1～表-2.4及び図-2.1～図-2.4に示した。応力計算にあたって Em 、 ν の値をいくらにすべきか問題はあるが、最終的に σ_1 、 σ_2 を各場所で求めるときに絶対値よりも、相対的な値の変化を問題にするので、第3紀層粘土の平均的な値として、 $Em = 6.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{kg}$ 、 $\nu = 0.4$ とした。

この場合応力と変形量の関係は

$$\begin{aligned} \Delta\gamma_H &= 8.33 \times 10^{-8} \sigma_H - 1.90 \times 10^{-8} \sigma_V \\ \Delta\gamma_V &= -1.90 \times 10^{-8} \sigma_H + 8.33 \times 10^{-8} \sigma_V \end{aligned}$$

となる。添字HとVはそれぞれ、等高線方向と傾斜方向を示している。上式を σ_H 、 σ_V について解くと、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_H &= 12.66 \times 10^6 \Delta\gamma_H + 2.89 \times 10^6 \Delta\gamma_V \\ \sigma_V &= 2.89 \times 10^6 \Delta\gamma_H + 12.66 \times 10^6 \Delta\gamma_V \end{aligned} \right\} \quad (2 \cdot 4)$$

表-2.1に第1回切取後の測定結果を示し、それに基づき、引張領域、圧縮領域および中

立領域を示したのが図2.1である。図中の破線で示した断面は計画切土面である。図から明らかな様に、斜面上部に引張、下部に圧縮領域が存在して典型的な斜面の応力状態を示している。測定値をみると、No.6 付近でとくに大きな圧縮応力を示しているが、このあたりは掘進孔に浸水がみられた地点で、他とは地盤の弾性係数の値が異なるため、応力値としては正確でない。一般的に含水量の多い軟弱な地点では大きな変位を示した。したがって次の切取りは上部に限るべきであった。

表2.1 表面応力測定結果（第Ⅰ回切取後）

測 点	(m) 距 離	上 方		下 方		特 記 事 項
		$\Delta\gamma(^{\circ}/100^{\circ}\text{mm})$	$\sigma(\text{kg}/\text{cm}^2)$	$\Delta\gamma(^{\circ}/100^{\circ}\text{mm})$	$\sigma(\text{kg}/\text{cm}^2)$	
No.0	0.0	-30.8	-1.064	-6.5	-0.225	クラックが等高線方向に走っていた
No.1	9.0	-4.5	-0.155	-9.0	-0.310	
No.2	19.0	-10.0	-0.346	-20.3	-0.701	
No.3	29.0	-50.0	-1.728	-51.7	-1.786	
No.4	39.0	13.4	0.463	-68.5	-2.368	
No.5	52.0	20.0	0.692	42.0	1.451	掘進孔に浸水
No.6	65.0	240.0	8.290	71.0	2.453	
No.7	76.0	31.0	1.071	22.0	0.760	道 路 端
No.8	20.0	20.0	0.692	18.0	0.622	

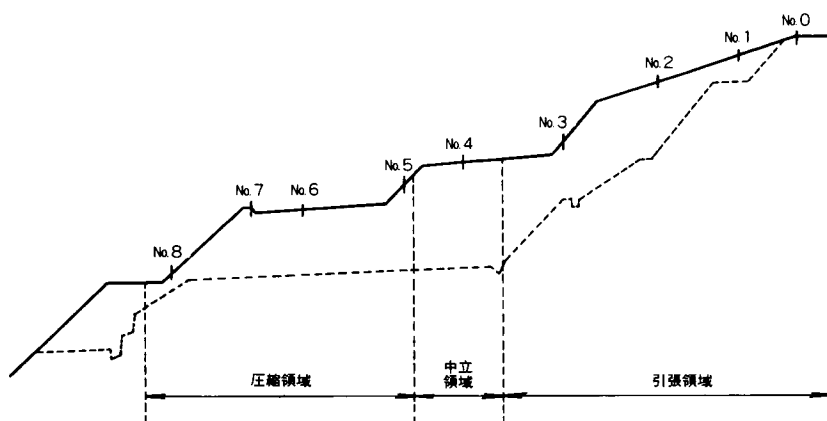


図-2.1 第Ⅰ回切取後の斜面の応力分布

しかしながら、次の切取りは斜面上部2,000m²下部No.7～No.8 付近の3,500m²の切取が行

なわれた。その測定結果を表-2.2、図-2.2に示す。これによれば、斜面の上部に圧縮領域が発生し、斜面中央部に引張領域が発達している。それに比較して、下部の圧縮領域が小さい事から非常に不安定な応力状態になっている。これは上部切土量に比べて下部の切土量が大きいためNo.2付近を頂部とする地すべりが予想された。

表-2.2 表面応力測定結果（第2回切取後）

測 点	(m) 距 離	上 方		下 方		特 記 事 項
		$\Delta\gamma(l/100^{mm})$	$\sigma(kg/cm^2)$	$\Delta\gamma(l/100^{mm})$	$\sigma(kg/cm^2)$	
No.0	0.0	-1.4	-0.485	1.0	0.346	上部切取部
No.1	10.0	1.1	0.380	2	0.069	
No.2	20.0	-7.7	-2.657	-9	-0.311	
No.3	40.0	-2.0	-0.692	-8	-0.276	
No.4	50.0	-2.6	-0.897	-1.0	-0.346	
No.5	60.0	-8.2	-2.829	-7.1	-2.450	
No.6	70.0	6.9	2.408	1.0	0.346	
No.7	80.0	-3.5	-1.208	-6.5	-2.243	
No.8	90.0	-5.2	-1.794	1.1	0.380	

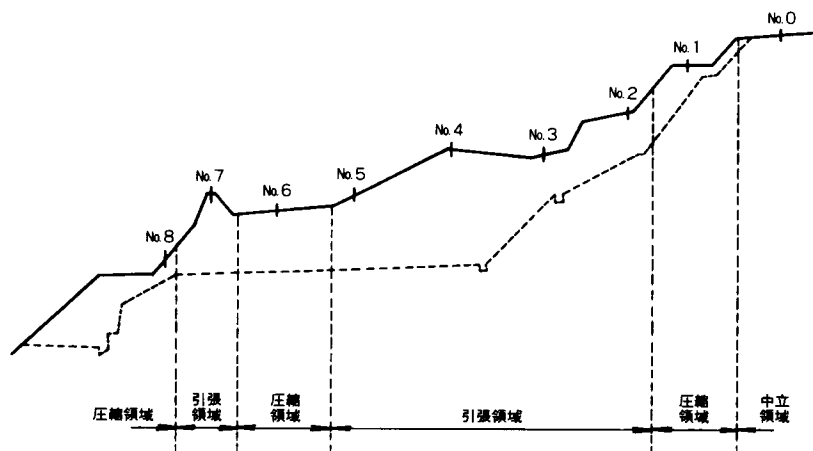


図-2.2 第2回切取後の斜面の応力分布

表-2.3、図-2.3は第2回測定で予想されたような崩壊が起った後の測定結果である。測点No.2付近に小規模の滑落崖がみられ、キレツが等高線方向に走っていた。この結果からはそれほど大きな応力はみられず、上部の滑落によって比較的安定な状態に落ちついたものとみることができる。しかし、No.2～No.3付近とNo.8付近にまだ引張領域が残っており、地すべりの継続が考えられた。

表-2・3 表面応力測定結果（崩壊後）

測 点	(m) 距 離	上 方		下 方		特 記 事 項
		$\Delta\gamma(1/100\text{mm})$	$\sigma(\text{kg}/\text{cm}^2)$	$\Delta\gamma(1/100\text{mm})$	$\sigma(\text{kg}/\text{cm}^2)$	
No.0	0.0	32	1.104	65	2.245	上部段切面
No.1	—	40	1.380	-25	-0.863	地すべり頭部
No.2	—	-18	-0.621	-13.5	-0.466	
No.3	—	-18	-0.621	-8	-0.276	
No.4	—	18	0.621	15.5	0.535	
No.5	—	-9	-0.311	52.5	1.811	
No.6	—	-27	-0.932	49	1.691	
No.7	—	-15.5	-0.535	-5	-0.173	
No.8	—	-47.5	-1.639	-64	-2.243	
No.9	—	2	0.069	36.5	1.259	

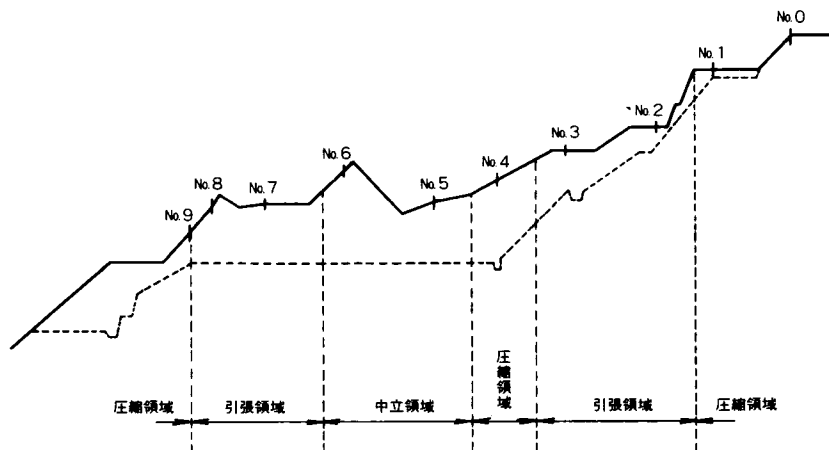


図-2・3 崩壊後の斜面の応力分布

表-2・4、図-2・4は崩壊後の斜面の応力分布測定結果に基づいて上部一段半を切取った後の測定結果で、勾配の変化によって細かく引張領域と圧縮領域に分かれ、応力の集中はみられない。しかし、最上部にまだ圧縮領域が広がり、崩壊が後方に進行する恐れがあった。その結果、計画切取断面の上部斜面の勾配をなだらかにすることが決定され、さらに斜面下部のNo.9付近の圧縮領域については擁壁による抑止工を行なうことになった。

表-2.4 表面応力測定結果（第3回切取後）

測 点	(m) 距 離	上 方		下 方		特 記 事 項
		$\Delta\gamma(1/100mm)$	$\sigma(kg/cm^2)$	$\Delta\gamma(1/100mm)$	$\sigma(kg/cm^2)$	
No.0	0.0	11.5	0.397	9.5	0.328	
No.1	10.0	6.0	0.207	-18.0	-0.621	
No.2	19.0	25.2	0.869	45.0	1.553	
No.3	29.0	6.0	0.207	2.5	0.086	
No.4	39.0	-9.0	-0.311	5.8	0.200	
No.5	49.0	-1.7	-0.059	-4.2	-0.145	
No.6	55.0	53.0	1.829	-6.0	-2.207	
No.7	65.0	-15.0	-0.518	-3.0	-0.104	
No.8	76.0	-21.0	-0.725	-36.0	-1.242	
No.9	92.0	12.5	0.431	18.6	0.642	

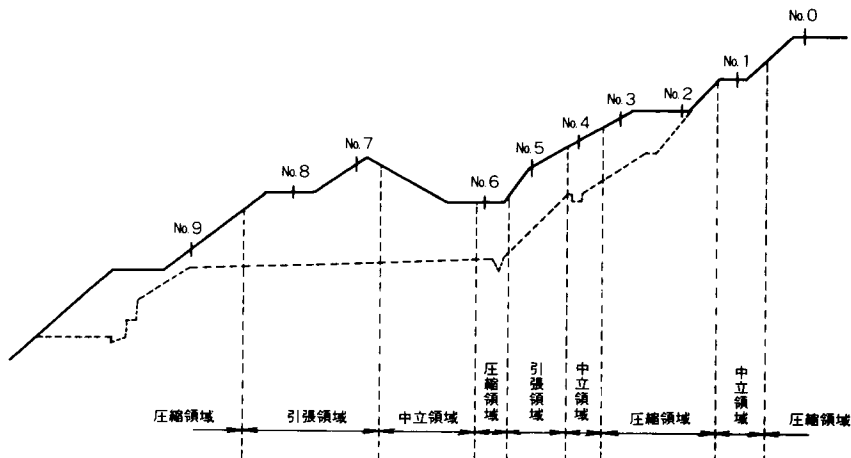


図-2.4 上部切取後の斜面の応力分布

2.4 結 論

本研究に示してきた現場測定は非常に簡単で、数回繰り返すことによって、任意の地点の応力状態をある程度定量的に把握することができ、地すべりの発生や規模をある程度予測することができる。しかし、現地の土質性状が各地点において非常に複雑な事が多く、完全に定量的に応力状態を知ることは不可能に近い。したがって、本章において示したように、斜面全体を大まかに圧縮領域、引張領域、中立領域の3つにわけ、そのバランスによって斜面の安定度を知るのが最も合理的かつ現実的であると考えらる。

参 考 文 献

- 1) 松林, 山口, 中村, 「地すべり斜面応力分布の測定について」地すべり, Vol. 13 No.3, pp. 1 ~ 5
- 2) Q. Zarrba and V. Mencl; "Landslide and Their Control" pp. 108~111, 1969.
- 3) 松尾新一郎訳, 「地すべりとその対策」鹿島出版会, pp.123~125, 1971.
- 4) V. Mencl, P. Peter, J. Jesenák, J. Skopek; "Three Questions on the Stability of Slopes," Inter. Conf. on S.M. and F.E. Vol. II, p.513, 1965.
- 5) 松尾, 富田, 「斜面の応力測定による切取りの施工管理に関する研究」, 土木学会関西支部年次学術講演会講演集, V-23, 1973.
- 6) Sachs, R. B. ; Some rheological properties under high pressure, Rheology I, Acad. Press., New York, 1956.

第3章 地すべり斜面構成土の物理化学的特性

1), 2), 3), 4)

3.1 地すべり地の概要

本章で対象とした地すべりは、兵庫県宝塚市の西部、六甲山系の北側にあたる赤坂峠周辺のいわゆる第三紀層地すべりである。地質は第三紀中新世の神戸層群を基盤とし、その上部に段丘堆積崩壊土がのっている。神戸層群の構成岩石は、泥岩、シルト岩、凝灰質砂岩が主体であり、一部に礫を含んでいる。神戸層群⁵⁾における地すべりは約2700ha、80個所に達しており、さらに地すべり被害面積は増加し続けている。

地すべりの直接的誘因は道路の付換え計画に基づく斜面の堀削工事によるものである。当該地すべり地の平面は図-3・1のとおりであり、図-3・2に地すべり斜面の中央縦断面を示している。地すべりは図 3・1に示されている1次滑落崖からはじまり、山側の2次滑落崖へと進行し、すべり速度は5～25cm/日であり、変位量の累計は最大226cmに達した。

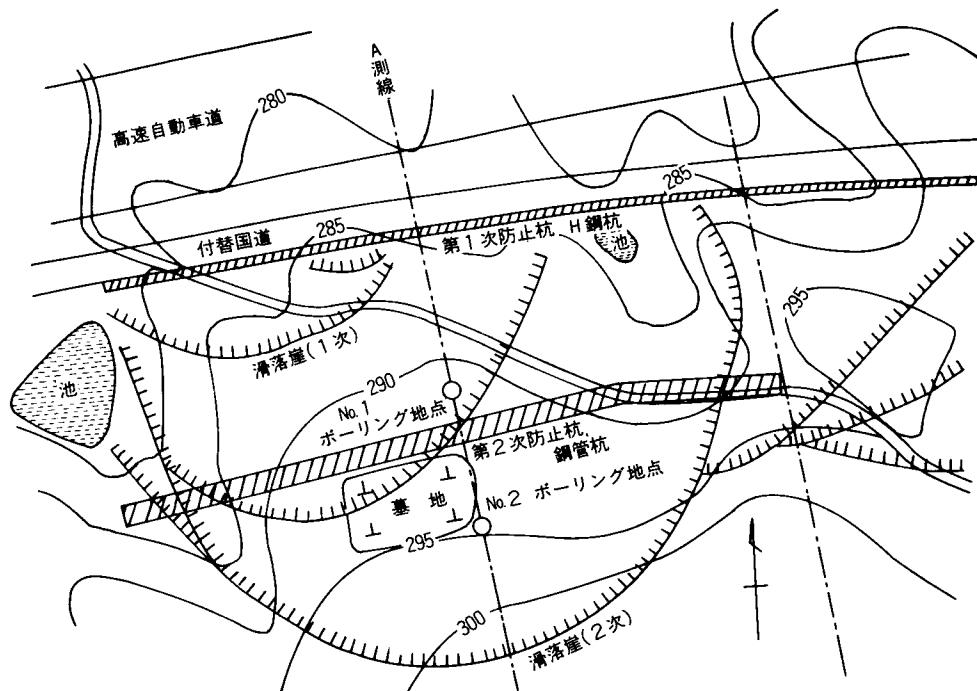


図-3・1 地すべり地平面図

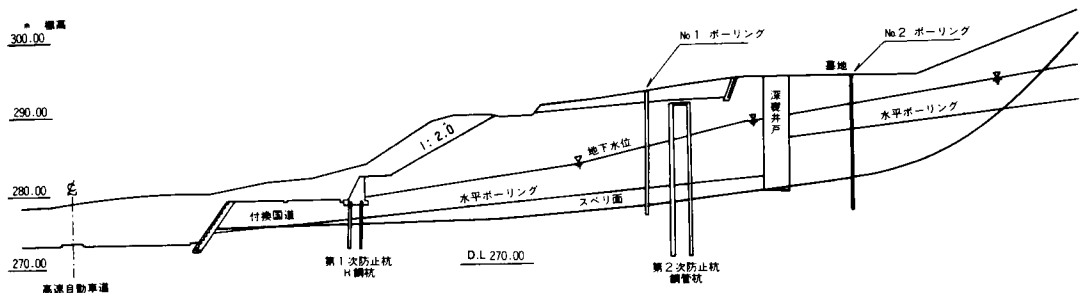


図-3・2 地すべり縦断面図

すべり面の測定は、図-3・1中に示されているように、No.1とNo.2の2点のボーリング孔中に設置された変位パイプのひずみ計によって図-3・3、図-3・4のようなデータが得られている。

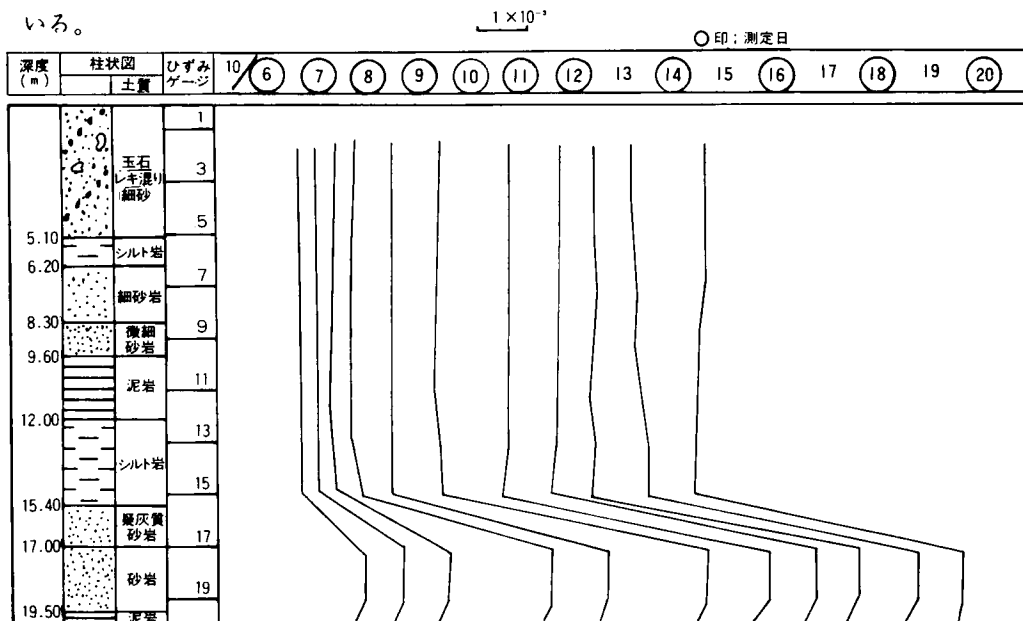


図-3・3 ひずみ柱状図 (No.1 ボーリング地点)

すべり面は神戸層群中の風化泥岩と凝灰質砂岩との境界層に形成されていることが判明している。ボーリングNo.1 では地表面下16m前後、No.2 では同じく18m前後にすべり面が存在していることになる。

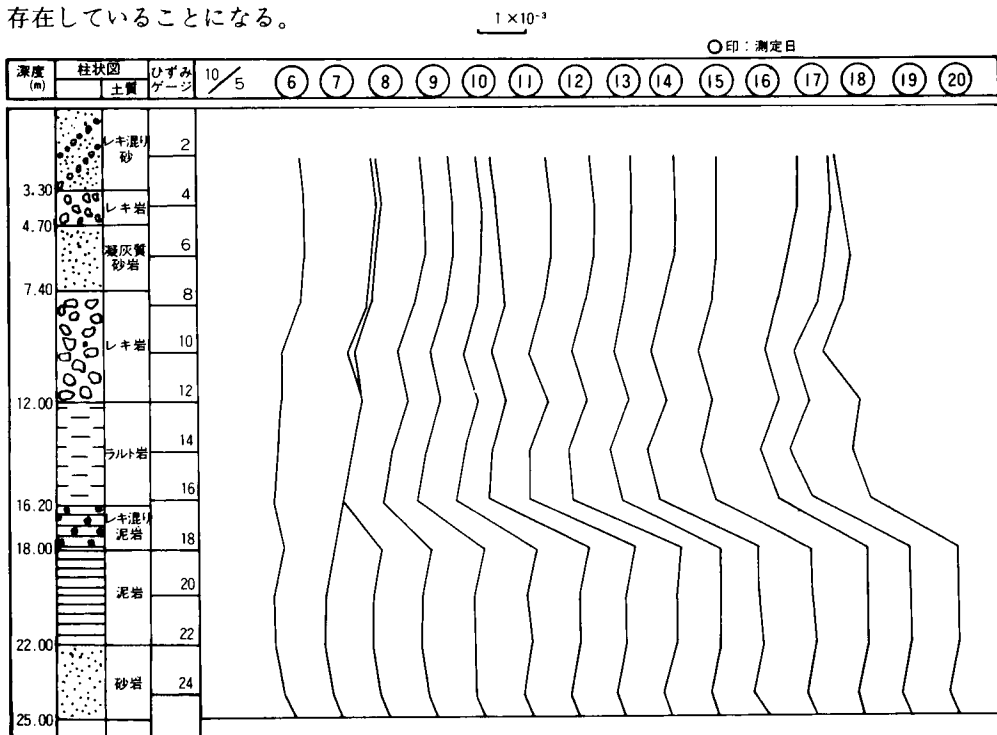


図-3・4 ひずみ柱状図 (No.2 ボーリング地点)

なお、地すべり斜面構成土の物理化学的特性の検討は、上記2地点で慎重に実施されたボーリング試料を用いて行なった。

3.2 鉱物分析

3.2.1 定性分析法

地すべり地帯には、その地質的特性と長年の自然の物理化学的営力によって、地すべり発生の素因となる粘土鉱物が多量に含まれている。本章ではX線回析分析によって、地すべり構成土の鉱物の同定と定量を行ない、地盤の安定度の手がかり及びすべり面推定の手段とする。

(1) 試料調整、実験条件および測定誤差

(i) 試料調整

ボーリング試料を20cmごとに区切り、その中心から採取したサンプルを110℃で炉乾燥した後、粉碎機に約15分間かけて粉碎する。次に粉碎土約0.5gを1規定塩化カルシウム溶液30ml中に入れ、1時間振とうして Ca^{2+} を飽和させた後、遠心分離器にかけ、溶液を除去し、蒸留水を2cc加え、十分に混合した状態からスポイトで0.5ccを取り、ガラス板上に定方位させたものを測定用試料とした。

ここで試料を Ca^{2+} で飽和させるのは、モンモリロナイトの膨潤しやすい層間に Ca^{2+} を吸着させ、回析ピークを $2\theta = 5.6^\circ$ ($d = 15.7 \text{ \AA}$) 付近に明確に発現させるためであり、定方位法を用いるのは、アルミ板に試料をつめこむ粉末法よりも、粘土鉱物の発現性がよく、かつ結晶度の良い石英、長石のピーク強度に関してバラツキが少ないためである。

(ii) 実験条件

実験条件はすべて次のように統一した。

Target ; Cu, Filter ; Ni, Voltage ; 40KV

Current ; 20mA, Count Full Scale ; 2000c.p.s.

Time Constant ; 1 sec, Scanning Speed ; $2^\circ/\text{min}$

Chart Speed ; 2 cm/min, Solar Slit ; 1° , Divergence Slit ; 1°

Receiving Slit ; 0.15mm, Base Line ; 120

Channel Window ; 480, Gain ; 62

(iii) 測定誤差

(I) 回析角度の誤差

i) 平板試料による影響：ゴニオメーターの光学系は集中法を使用しているので、厳密には、試料板がわん曲していることが必要。

ii) 試料によるX線吸収の影響：試料の吸収係数により、X線回析量の程度が異なる。

iii) 試料の回転軸からの偏心ずれ：できるだけ試料面を回転軸と一致させ、表面を滑らかにする。

iv) 入射ビームの垂直方向の発散

v) 受光スリット幅による影響

これらの影響による回析図を以下に示す(図-3.5)。⁶⁾

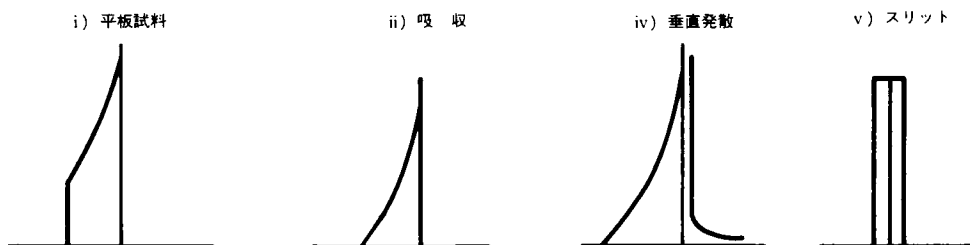


図-3-5 各影響による回析線

(II)強度測定誤差

- i) 計数値の変動：X線計数値は統計的変動をもつため、誤差評価をしなければならない。Nカウントの測定値に対する標準偏差は

$$\sigma = \sqrt{N}$$

で表わされ、多数回測定の場合、この範囲に入り、99.73%は3 σ の誤差範囲に入る。

- ii) バックグラウンドの影響：X線測定においては、回析線の他にバックグラウンドが以下の原因で発生する。

- (1) X線通路の空気等による散乱X線
- (2) 試料からの散乱X線
- (3) 試料からの2次X線

バックグラウンドが大きくなる程、測定精度は落ち、標準偏差 σ は増加する。

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{P+B} + \sigma_B}$$

σ_{P+B} : 〔回析ピーク強度+バックグラウンド〕の標準偏差

σ_B : バックグラウンドの標準偏差

(2) 分 析 法

(i) 定性分析

(I) 原理

結晶はそれぞれ多くの結晶面からなっているが、それぞれの結晶面は特有の面間隔dをもっており、X線に対する反射強度もそれぞれ異なる。3.2.1に従って作成された試料より得られたデータを Blagg の条件式に順じて2 θ からdの換算をおこない、既知試料のデータと比較すれば、試料中の構成結晶成分を識別することができる。

(3) 実験結果と考察

実験結果を図-3-6及び付図-3-1～3-23に示す。

(i) 全般的傾向

ボーリングNo.1, No.2とも部分的にイライト（あるいは雲母）、カオリナイトの存在が認められるが、全般的には、石英、長石、モンモリロナイトの回析ピークが卓越していることから、これら3鉱物が斜面構成土の主成分であるということが出来る。また、No.1試料では、すべり面付近にアロフェンが存在することを赤外線吸収スペクトル分析によって推定できるが、これは凝灰質砂岩層における風化生成物である。さらに、レキ、砂岩、細砂岩層においては石英、長石ピーク、シルト岩、泥岩層においてはモンモリロナイトのピークの発現性がそれぞれ高い。

(ii) すべり面付近

(イ) ボーリングNo.1

すべり面は12.0～15.4mのシルト層と、15.4～17.0mの凝灰質砂岩層の境界部に存在する（図-3・6及び付図-3・8参照）。

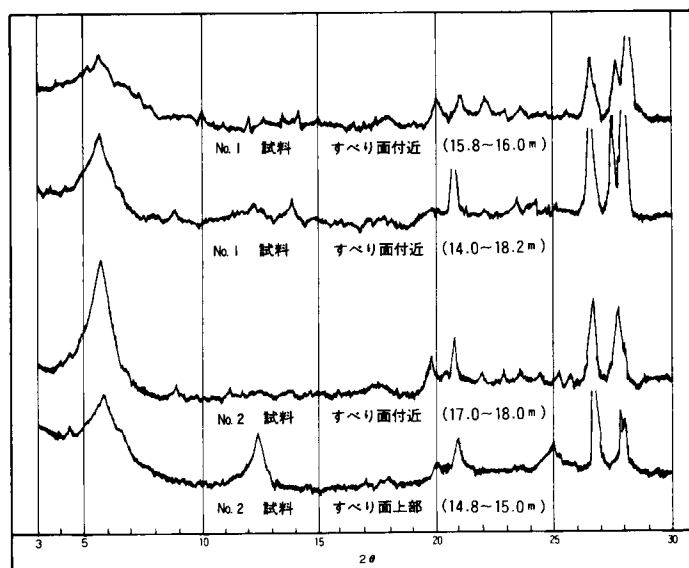


図-3・6 すべり面粘土のX線回折

すべり面上部のシルト岩層では、モンモリロナイトのピークがかなり大きく出ている。一方凝灰質砂岩層は全体として石英ピークが極端に低く、上部の15.4～16.2mまでは、サンプルを Ca^{2+} で飽和したにもかかわらずモンモリロナイトのピークはブロードに拡がり、バックグラウンドが非常に高い傾向を示すが、これは非晶質の存在によるものと思われる。図-3・7の赤外線吸収スペクトル分析の結果によれば、アロフェンであることが判明した。

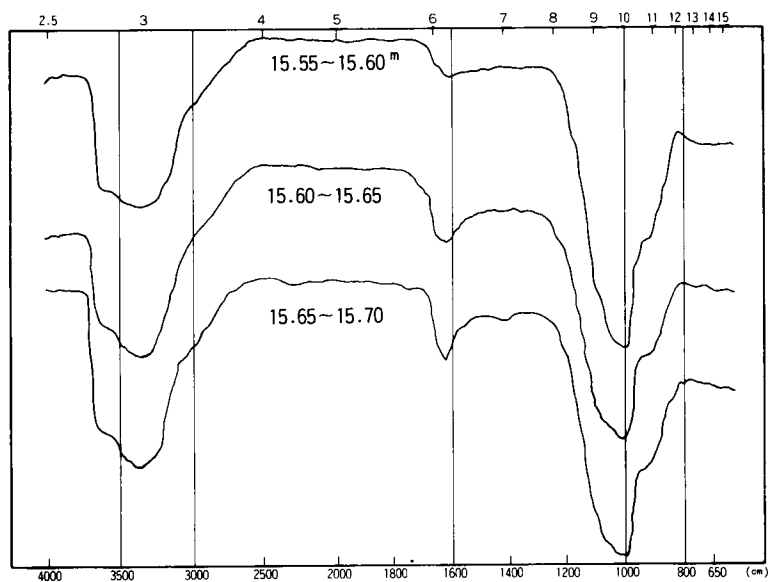


図-3・7 赤外線吸収スペクトル図

また、下部16.2~17.0mでは Ca^{2+} の吸着により、モンモリロナイトのピークは鋭くなるが、バックグラウンドはいぜんとして高く、新たに、 $2\theta=9.8^\circ$ ($b=9.1\text{\AA}$) にパイロフィライトのピークが存在する。パイロフィライトは、中世代末~中新世の流紋岩、石英安山岩かそれらの火砕岩、石英斑岩の熱水変質で形成される岩石で葉ろう石といわれる⁷⁾。これは構造的には雲母に似た層状硅酸塩で、雲母との相違は各層が電氣的に飽和しており、層間陽イオンをもたない。従って、電気化学的な手段によってはこれの安定化は不可能な鉱物である。

以上より、この凝灰質砂岩層は、中新世の瀬戸内火山系の活動時に形成されたものであり、熱変成を受けた基盤岩類上部に火山灰が堆積したものと考えられる。

(ロ) ボーリングNo.2

すべり面は12.0~16.2mのシルト岩層と16.2~18.0mのレキ混り泥岩層の境界部に存在する(図-3.6参照)。シルト岩層ではモンモリロナイトのピークが顕著であり、レキ混り泥岩では、モンモリロナイトピークはやや落ち、石英ピークの出現性が高いことから、レキが優勢な層である。

3.2.2 定量分析

(1) 原理

測定条件を一定にしたとき、試料からの回析X線強度が回析に寄与する結晶成分量に関係することを利用するもので、検量線を用いることにより物質量を定量する。

n 結晶成分からなる試料中の i 結晶の回析線強度 I_i は L. Alexander と H.P. Klug⁸⁾ によって導かれたように、

$$I_i = \frac{Q_i \cos \theta_1 I_0 W_i}{W_i (\mu_j \cos \theta_1 + \mu'_j \cos \theta_2) + \sum_{j \neq i} W_j (\mu_j \cos \theta_1 + \mu'_j \cos \theta_2)}$$

I_i : n 成分中の i 成分の回析線強度

W_i : i 成分の重量濃度, W_j ; j 成分の重量濃度

I_0 : 入射X線強度

θ_1 : 入射X線の入射角

θ_2 : 回析X線の試料面となす角

Q_i : 単位質量の結晶が入射X線を回析X線に変換する割合

μ_j : 入射X線に対する i 成分の質量吸収係数

μ'_j : 回析X線に対する i 成分の質量吸収係数

μ_i : 入射X線に対する j 成分の質量吸収係数

μ'_j : 回析X線に対する j 成分の質量吸収係数

で与えられる。この式をX線回析に適用すれば、

① 入射角 θ_1 と反射角 θ_2 は等しいので、

$$\cos \theta_1 = \cos \theta_2$$

② 入射X線波長と回析X線波長は等しいので試料による吸収係数も等しく

$$\mu_i = \mu'_i$$

$$\mu_j = \mu'_j$$

よって

$$I_i = \frac{1}{2} \times \frac{Q_i W_i I_0}{\mu_j W_i + \sum_{j \neq i} \mu_j W_j}$$

ここで、求める結晶成分以外の残余成分について質量吸収係数を考え、

$$\frac{\sum_j \mu_j W_j}{1 - W_i} = \mu_M$$

とおき、

$$\rho_i Q_i = K_i$$

とおく。 Q_i は同一結晶でも格子面によって異なるが、一般に、この種の比例定数として K_i ($= \rho_i Q_i$, ρ_i は i 結晶の密度)をとり、単位体積の反射能をとる。

さらに、 $K_i = K_i I_0 / 2$, $W_i = x_i$ と記号を変えて

$$I_i = \frac{K_i x_i}{\rho_i [\mu_i x_i + \mu_M (1 - x_i)]}$$

$$= \frac{K_i x_i}{\rho_i [(\mu_i - \mu_M) x_i + \mu_M]}$$

が得られる。

この式は試料の種類によって、次のように変形される。

(i) 2成分系 $\mu_1 \neq \mu_2$ の場合

求める結晶成分1が $x_1 = 1$ (100%試料) から得られる強度を $I_{1,0}$ とすると

$$\frac{I_1}{I_{1,0}} = \frac{x_1 \mu_1}{x_1 (\mu_1 - \mu_2) + \mu_2}$$

となる。図-3-8で $\mu_1 > \mu_2$ の場合、検量線は上に凸形になり、 $\mu_1 < \mu_2$ の場合は下に凸形となる。

(ii) n 成分系 $\mu_i = \mu_M$ の場合

$$I_i = \frac{K_i}{\rho_i \mu_M} x_i = K x_i$$

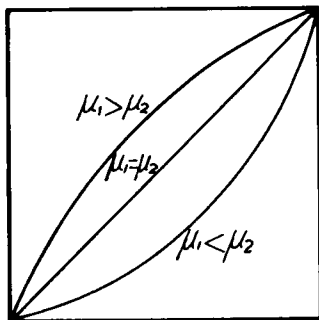


図-3-8 マトリックス効果を受けた回析強度図

となり、図-3-8で、直線の検量線となる。

(iii) n 成分系 $\mu_i \neq \mu_M$ の場合試料のマトリックスに応じて μ_M の値が変化するので一般には内標準法が用いられる。これは n 成分中の i の量を決定したいとき、試料に対して一定重量パーセントの標準物質を加え、成分 i と標準物質 s の回析X線強度 I_i , I_s を測定すれば

$$x = K \frac{I_i}{I_s}$$

の関係が成立し、あらかじめ求めておいた検量線より x を求めることができる。

(2) 標準試料と測定法

(i) 標準試料

本研究では定性分析により、地すべり斜面構成土の結晶成分が判明している。よって n 成分 μ_i キ μ_M ではあるが、測定試料に類似したマトリックスの標準試料を作成し、その X 線回析強度と含有率の直線関係として求め、試料の定量を行なう。なお標準試料のマトリックスは表-3・1に示すように配合し、以下に述べる方法で X 線回析強度を求める。

(ii) 測定法

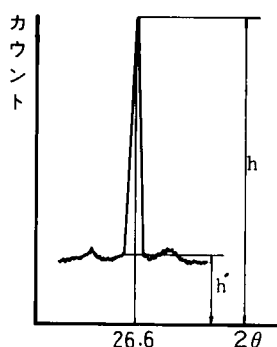


図-3・9 石英回析ピーク

i) 石英：図-3・9は石英の回析図であるが、この場合ゴニオメーターの角度をピークの発現する $2\theta = 26.6^\circ$ に設定し、定時計数法を用いて10秒間カウントし、バックグラウンドを除去する。

$$A_0 = 10(h - h')$$

A_0 : 石英ピーク強度

h : 石英ピーク高

h' : バックグラウンド高

表-3・1 標準試料マトリックス (重量%)

試料番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Q	0	0	0	0	0	5	5	5	5	5	10	10	10	10	10	15	15	15	15	15
M	70	65	60	55	50	65	60	55	50	45	60	55	50	45	40	55	50	45	40	35
Ca-F	20	25	25	30	30	20	25	25	30	30	20	25	25	30	30	20	25	25	30	30
K-F	10	10	15	15	20	10	10	10	15	20	10	10	15	15	20	10	10	15	15	20

試料番号	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Q	20	20	20	20	20	25	25	25	25	25	30	30	30	30	30	35	35	35	35	35
M	50	45	40	35	30	45	40	35	30	25	40	35	30	25	20	35	30	25	20	15
Ca-F	20	25	25	30	30	20	25	25	30	30	20	25	25	30	30	20	25	25	30	30
K-F	10	10	15	15	20	10	10	15	15	20	10	10	15	15	20	10	10	15	15	20

試料番号	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Q	40	40	40	40	40	45	45	45	45	45	35	30	30	25	20	60	70	80	90	95
M	30	25	20	15	10	25	20	15	10	5	60	60	70	70	70	0	0	0	0	0
Ca-F	20	25	25	30	30	20	25	25	30	30	5	10	0	5	10	40	30	20	10	5
K-F	10	10	15	15	20	10	10	15	15	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

試料番号	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
Q	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
M	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Ca-F	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
K-F	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Q : 石 英

M : モンモリロナイト

Ca-F : 灰長石

K-F : カリ長石

ii) 長石：図-3・10は長石の回析ピークであるがピークはほとんどの場合、2本出現する。

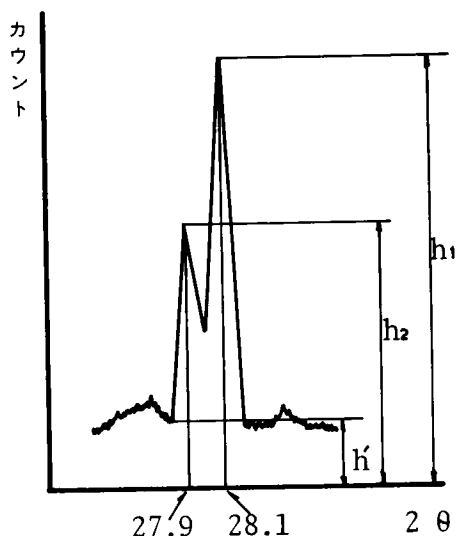


図-3・10 長石回析ピーク

$2\theta=28.1^\circ$ 付近は灰長石、ソウ長石、 $2\theta=27.9^\circ$ 付近はカリ長石にそれぞれ起因するピークであるが、石英と同方法で2本のピークを測定し加えたものを、長石のピーク強度とする。

$$A_F = 10 \{ (h_1 - h') + (h_2 - h') \}$$

A_F : 長石ピーク強度

h_1 : 28.1° 付近ピーク高

h_2 : 27.9° 付近ピーク高

iii) モンモリロナイト；図-3・11はモンモリロナイトの回析図であるが結晶性が悪く、回析線が広がるので、積分強度を求める。すなわち、ピークが立ち始める α° よりピークの終る β° までの強度を積分し、バックグラウンドの台形面積を差し引く。

$$A_M = S_I - S_B$$

A_M : モンモリロナイトピーク面積

S_I : 積分強度

S_B : バックグラウンド面積

以上のように、定時計数法や積分強度によってカウントを大きくし誤差を少なくしている⁹⁾。なお、同一サンプルについて測定試料を2個作成し、測定はそれぞれについて3回ずつ行ない、平均した値を測定値として採用している。

このようにして得られた標準試料の検量線と最小二乗法によって求めた検量線方程式を、モンモリ

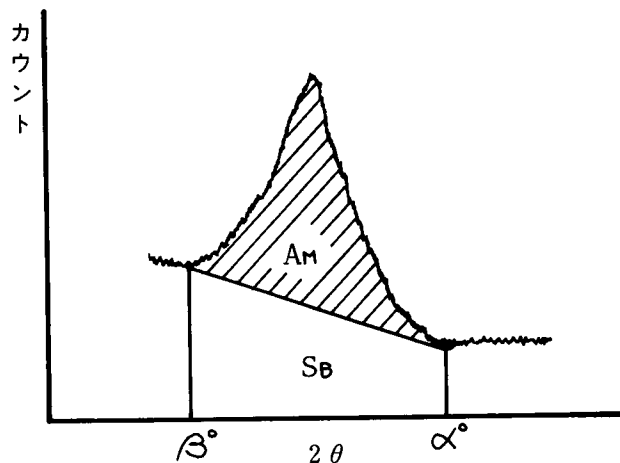


図-3・11 モンモリロナイト回析ピーク

ロナイト、図-3・12、図-3・13、石英図-3・14、長石図-3・15に示す。モンモリロナイトの低含有率部分はマトリックス効果を考慮して、別に検量線を作成した。

(3) 実験結果と考察

表-3・6～表-3・10、図-3・16、図-3・17に定量結果を示す。標準試料は、定性分析から判明した斜面構成土の主成分である石英、長石、モンモリロナイトの3鉱物で作成したが、定量の結果3成分を加え合わせて100%に満たない場合は、構成土にカオリナイト、イライト、非晶質が存在することを考慮してその他の鉱物の項を設けて、100%にした。また、

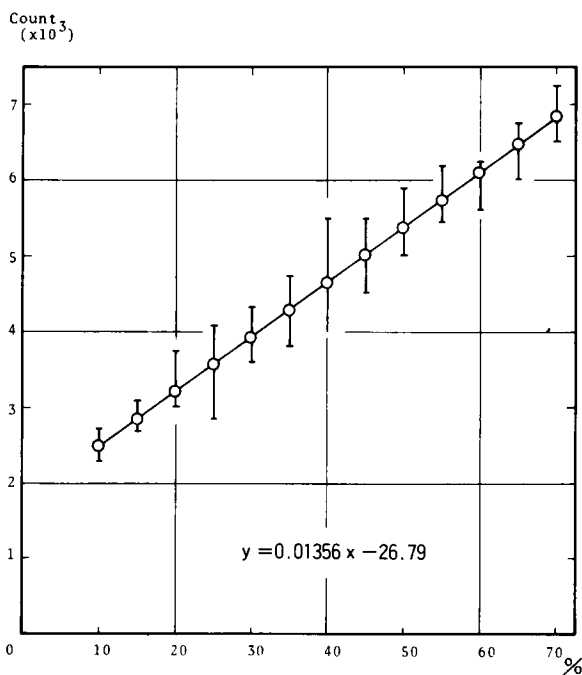


図-3-12 モンモリロナイト定量用検量線 (含有率10%以上)

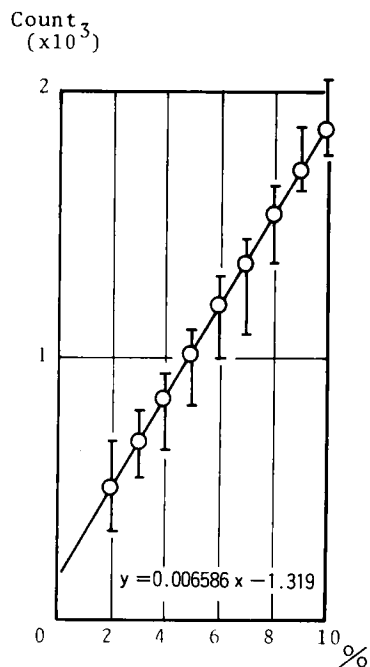


図-3-13 モンモリロナイト定量用検量線 (含有率10%以下)

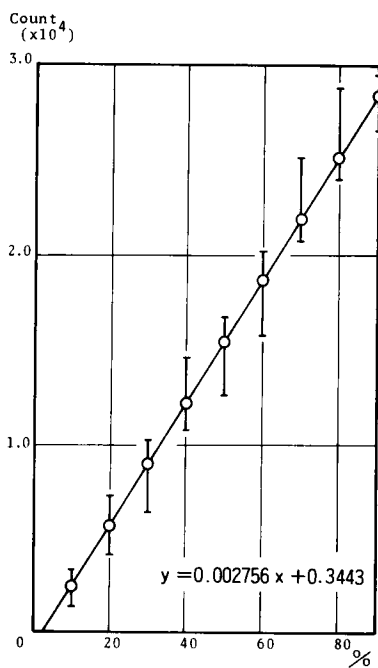


図-3-14 石英定量用検量線

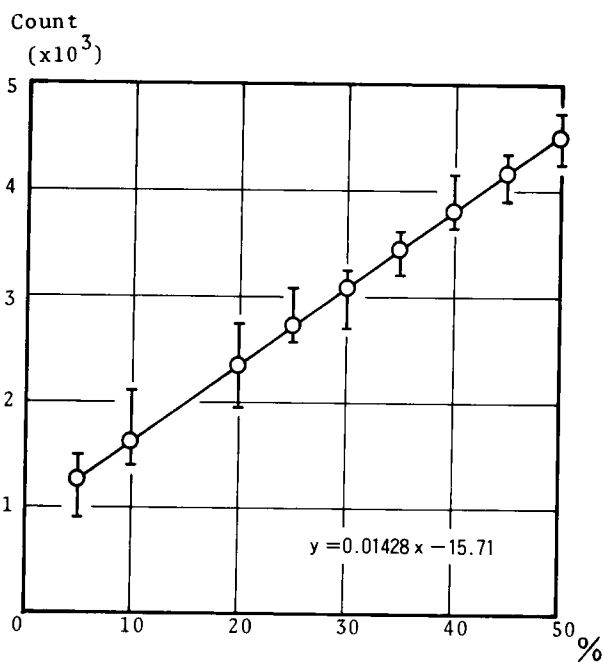


図-3-15 長石定量用検量線

マトリックス効果および測定誤差から100%を越える場合もあるが、修正を行わずに表に記載し、図においては過剰濃度を長石より差し引いて100%にした。

(i) 全般的傾向

モンモリロナイトの含有率は、レキ、砂岩層（平均8%）、細砂岩層（約20%）、シルト岩、泥岩層（約50%）の順であり、石英長石の含有率の大小関係はこの逆になることから、風化進行により、長石は粘土鉱物になり、石英も含有率の落ちることがわかる。

(iii) すべり面付近

i) ボーリングNo.1

上部層のシルト岩層の3成分構成比は、石英：長石：モンモリロナイト＝25：25：50とモンモリロナイトの含有率が高くなっている。

下層の凝灰質砂岩層では、その他の鉱物の占める割合が無視できなくなり、上部15.4m～16.2mにおいて、石英：長石：モンモリロナイト：（その他の鉱物）＝10：25：15：50、下部16.2m～17.0mでは10：20：35：35となっている。

15.4～16.2m層で特に（その他の鉱物）の含有率が高いのは、モンモリロナイトのピークがブロードでかつバックグランドが高いため算定面積値が小さくなること、石英、長石の含有率が小さいことの2点からである。バックグランドの高いのは、非晶質物質の存在に起因している。しかし、火山灰は非排水状態における風化過程で多量のモンモリロナイトを生成すること、非晶質によるマトリックス効果によって、モンモリロナイトピークの発現性が悪くなっていると考えられることと、石英、長石の含有率が非常に低いことなどから、計算結果以上のモンモリロナイトが存在していると推定できる（図-4・36では上述を考慮してモンモリロナイトとその他の鉱物の境界を破線にしている）。

ii) ボーリングNo.2

すべり面上部のシルト岩層では、石英：長石：モンモリロナイト＝25：15：60とモンモリロナイトがかなり高い含有率を示しているが、すべり面下部のレキ混り泥岩層では、55：20：15：10と石英、長石の占める割合が大きい。但し、境界部の15.8～16.2mにかけてはその他の鉱物の割合が30%前後と大きくなるが、バックグランドが高くないことから非晶質物質の存在に起因するものではなく、カオリナイトの存在によるものと思われる。

なお、ボーリングNo.1の凝灰岩質砂岩層に存在が認められた非晶質物質について、その確認のため、図-3・7に示すように赤外線吸収スペクトル分析をおこなった。

表-3・2 X線回折定量値（重量パーセント）（ボーリングNo.1）

	Q	F	M	other	Q+F+M
0.0 m	2.00	29.47	8.21	20.32	79.68
0.2	50.31	32.65	8.05	8.99	91.01
0.4	57.79	22.86	10.10	9.25	90.75
0.6	53.46	36.16	11.21	/	100.83
0.8	8.34	24.49	11.45	5.92	94.08
1.0	55.51	38.06	11.88	/	105.45
1.2	54.16	35.08	12.54	/	101.78
1.4	60.92	32.29	10.21	/	103.42
1.6	61.19	25.32	6.28	7.21	92.79
1.8	55.95	40.28	4.11	/	100.34
2.0	57.10	39.11	5.82	/	102.03
2.2	49.75	35.89	11.59	2.77	97.23
2.4	1.36	35.35	4.48	8.81	91.19
2.6	51.01	40.44	6.21	2.34	97.66
2.8	67.16	29.11	3.09	0.64	99.36

	Q	F	M	other	Q+F+M
3.0	65.18	23.06	9.67	2.09	98.93
3.2	50.21	46.89	5.21	/	102.31
3.4	49.38	37.51	8.73	4.38	95.61
3.6	54.01	36.94	11.21	/	102.16
3.8	44.50	34.32	9.56	11.62	88.38
4.0	42.85	45.02	6.21	5.92	94.08
4.2	52.05	39.04	5.88	3.03	96.97
4.4	45.58	38.21	11.21	4.99	95.01
4.6	43.71	38.24	9.31	8.74	91.26
4.8	43.83	37.59	12.56	6.02	93.98
5.0	38.25	26.89	33.25	/	103.39
5.2	25.79	15.89	52.54	1.61	98.39
5.4	26.61	15.71	56.28	1.40	98.60
5.6	21.35	18.29	42.89	17.47	82.53
5.8	21.35	18.29	42.89	17.47	82.53

Q = Quartz F = Felspars M = Montmorillonite other = other minerals
0.0 m = 0.0 m ~ 0.2 m

表-3・3 X線回折定量値（重量パーセント）（ボーリングNo.1）

	Q	F	M	other	Q+F+M
6.0 m	10.42	18.72	64.33	6.52	93.47
6.2	34.18	17.72	36.32	11.78	88.22
6.4	29.44	20.81	33.70	16.05	83.95
6.6	30.94	19.93	20.93	28.20	71.80
6.8	28.12	21.59	32.14	17.88	82.12
7.0	29.75	24.58	19.12	26.55	73.45
7.2	23.12	24.45	18.07	34.36	65.64
7.4	20.88	23.45	40.05	10.62	89.38
7.6	31.20	36.01	15.15	17.64	82.36
7.8	19.03	22.32	40.35	18.30	81.70
8.0	34.54	29.22	20.40	15.84	84.16
8.2	32.14	20.13	29.58	18.15	81.85
8.4	31.20	27.15	19.05	22.60	77.40
8.6	30.91	32.18	15.02	21.89	78.11
8.8	34.24	34.58	17.38	13.80	86.20

	Q	F	M	other	Q+F+M
9.0 m	24.34	34.38	14.51	26.77	73.23
9.2	25.46	45.87	13.73	14.94	85.06
9.4	27.12	30.01	18.21	24.66	75.34
9.6	23.25	16.12	55.57	5.06	94.94
9.8	20.15	19.72	43.90	16.23	83.77
10.0	20.94	15.46	60.29	3.31	96.69
10.2	19.98	19.30	68.08	/	107.36
10.4	22.34	19.22	57.04	1.40	98.60
10.6	18.39	21.44	61.08	/	100.88
10.8	17.74	22.98	88.40	/	129.12
11.0	29.59	23.08	54.20	/	106.69
11.2	26.81	22.72	49.15	1.32	98.68
11.4	23.63	21.72	53.24	1.41	98.59
11.6	31.03	23.72	43.56	1.70	98.30
11.8	31.49	26.01	49.56	/	107.06

表-3・4 X線回析定量値（重量パーセント）（ボーリングNo.1）

	Q	F	M	other	Q+F+M
12.0 m	34.53	26.01	36.83	2.63	97.37
12.2	35.30	25.01	15.04	24.65	75.35
12.4	38.77	20.15	15.08	26.00	74.00
12.6	35.04	24.43	29.62	10.91	89.09
12.8	37.92	28.44	27.72	5.92	94.08
13.0	29.21	27.15	29.84	13.80	86.20
13.2	28.34	24.15	20.76	26.75	73.25
13.4	32.47	27.29	33.96	6.28	93.72
13.6	21.41	20.20	48.89	9.42	90.58
13.8	25.91	22.86	63.29	／	112.06
14.0	27.54	25.86	45.62	0.98	99.02
14.2	29.65	28.44	59.25	／	117.34
14.4	30.66	28.87	37.53	2.94	97.06
14.6	23.91	25.01	37.30	3.18	86.82
14.8	25.83	25.72	41.63	6.82	93.18

	Q	F	M	other	Q+F+M
15.0 m	28.68	24.29	40.03	7.00	93.00
15.2	32.21	25.72	44.10	／	102.03
15.4	38.34	34.68	18.12	38.86	61.14
15.6	26.55	30.01	5.31	38.13	61.87
15.8	10.85	22.15	12.14	54.76	45.24
16.0	9.87	18.58	18.02	53.53	46.47
16.2	8.06	18.86	20.71	52.37	47.63
16.4	8.40	14.29	34.28	43.03	56.97
16.6	8.59	24.55	46.65	20.21	79.79
16.8	8.39	33.58	32.94	25.09	74.01
17.0	66.94	14.29	7.21	11.56	88.44
17.2	70.86	16.01	6.08	7.05	92.95
17.4	73.85	19.29	7.96	／	101.10
17.6	64.66	18.58	7.21	9.55	90.45
17.8	74.14	17.15	5.11	3.60	96.40

表-3・5 X線回析定量値（重量パーセント）（ボーリングNo.1）

	Q	F	M	other	Q+F+M
18.0 m	79.89	20.01	6.06	／	104.96
18.2	61.86	15.72	7.98	14.44	85.56
18.4	47.89	21.01	15.21	15.89	84.11
18.6	66.17	17.86	9.02	6.95	93.05
18.8	66.49	17.21	8.71	7.59	92.41
19.0	67.44	21.44	4.22	6.90	93.10
19.2	69.43	13.58	5.16	11.83	88.17
19.4	46.52	18.86	21.10	13.52	86.48
19.6	37.82	20.18	33.10	8.90	91.10
19.8	35.59	22.87	38.87	2.67	97.33

表-3-6 X線回析定量値（重量パーセント）（ボーリングNo.2）

	Q	F	M	other	Q+F+M
0.0 m	66.08	11.43	12.21	10.28	89.72
0.2	74.87	12.14	10.87	2.12	97.88
0.4	73.99	9.29	9.68	7.04	92.96
0.6	67.71	11.29	11.56	9.44	90.56
0.8	61.78	33.15	7.81	/	102.74
1.0	80.41	15.86	6.21	/	102.48
1.2	61.32	14.29	9.22	15.17	84.83
1.4	61.99	12.85	11.05	14.11	85.89
1.6	69.13	31.44	7.21	/	107.78
1.8	66.86	36.58	8.21	/	111.65
2.0	38.18	48.80	9.65	3.37	96.63
2.2	69.88	25.01	7.21	/	102.10
2.4	55.95	28.58	6.64	8.83	91.17
2.6	71.39	25.44	5.61	/	102.44
2.8	57.94	20.29	7.65	14.12	85.88

	Q	F	M	other	Q+F+M
3.0 m	62.92	39.37	7.36	/	109.65
3.2	56.18	30.15	6.28	7.39	92.61
3.4	51.79	35.30	8.65	4.26	95.74
3.6	56.77	40.15	7.77	/	104.69
3.8	59.54	47.44	4.73	/	111.72
4.0	65.08	41.30	5.63	/	112.01
4.2	65.56	26.58	6.84	1.02	98.98
4.4	50.95	46.02	5.21	/	102.18
4.6	53.40	50.00	3.35	/	106.75
4.8	60.96	30.01	5.21	3.80	96.20
5.0	40.31	44.73	9.73	5.23	94.77
5.2	39.21	42.87	5.11	12.81	87.19
5.4	50.24	52.16	4.81	/	107.21
5.6	47.13	40.15	3.23	8.99	91.01
5.8	35.69	63.02	3.65	/	102.36

Q = Quartz F = Felspars M = Montmorillonite other = other minerals
0.0 m = 0.0 m ~ 0.2 m

表-3-7 X線回析定量値（重量パーセント）（ボーリングNo.2）

	Q	F	M	other	Q+F+M
6.0 m	46.69	37.15	7.44	8.72	91.28
6.2	32.67	59.16	8.21	0.05	99.95
6.4	44.41	42.15	5.43	8.01	91.99
6.6	36.99	65.88	6.27	/	109.14
6.8	47.78	50.44	1.85	/	100.07
7.0	11.72	76.02	10.21	2.05	97.95
7.2	43.59	65.74	7.63	/	116.96
7.4	45.47	61.75	3.16	/	110.38
7.6	43.41	71.31	4.11	/	118.83
7.8	34.11	65.88	5.18	/	105.17
8.0	48.10	65.45	4.92	/	118.47
8.2	55.15	65.59	1.66	/	122.40
8.4	56.16	67.45	2.73	/	126.34
8.6	45.67	42.30	4.75	7.26	92.74
8.8	52.61	48.30	2.13	/	103.04

	Q	F	M	other	Q+F+M
9.0 m	42.00	62.59	4.23	/	108.82
9.2	52.72	57.45	3.65	/	113.82
9.4	51.94	55.75	1.87	/	109.56
9.6	51.67	45.74	2.21	/	109.63
9.8	52.59	50.88	3.71	/	107.18
10.0	53.87	51.45	6.14	/	111.46
10.2	43.03	53.16	5.33	/	101.52
10.4	52.77	52.89	2.98	/	108.64
10.6	0.87	52.91	3.17	/	116.95
10.8	54.91	50.98	2.87	/	108.76
11.0	7.38	54.02	3.06	/	114.46
11.2	59.78	56.45	6.39	/	122.62
11.4	57.30	55.88	5.86	/	117.04
11.6	53.94	48.45	6.72	/	109.11
11.8	68.94	41.05	5.15	/	115.11

表-3-8 X線回析定量値（重量パーセント）（ボーリングNo.2）

	Q	F	M	other	Q+F+M
12.0 m	37.06	25.01	26.77	11.16	88.84
12.2	32.44	24.29	36.25	7.02	92.98
12.4	26.63	17.86	59.45	/	104.04
12.6	23.46	16.00	58.73	1.81	98.19
12.8	27.58	8.21	71.85	/	107.64
13.0	25.47	7.01	65.95	1.57	98.43
13.2	40.38	36.44	26.03	/	102.85
13.4	27.89	11.21	67.19	/	106.29
13.6	28.39	9.21	65.02	/	102.62
13.8	24.23	8.61	79.07	/	111.91
14.0	27.72	9.26	66.78	/	103.15
14.2	27.32	8.81	64.42	/	100.55
14.4	27.91	8.15	63.85	/	100.41
14.6	29.11	9.92	64.10	/	103.13
14.8	25.43	9.24	74.50	/	109.17

	Q	F	M	other	Q+F+M
15.0 m	29.88	10.01	32.30	27.81	72.19
15.2	23.88	15.72	47.47	12.93	87.07
15.4	27.91	8.71	45.61	17.77	82.23
15.6	24.08	12.02	41.65	22.25	77.75
15.8	25.51	10.93	35.80	27.76	72.24
16.0	41.67	16.30	16.07	25.96	74.04
16.2	27.65	8.73	13.75	49.87	50.13
16.4	26.03	21.14	15.87	36.96	63.04
16.6	28.04	22.36	20.63	28.97	71.03
16.8	6.67	20.86	8.21	14.26	85.74
17.0	59.09	19.58	12.36	8.97	91.03
17.2	50.81	19.72	13.21	16.26	83.74
17.4	54.95	18.21	15.32	11.52	88.48
17.6	55.87	19.72	11.65	12.76	87.24
17.8	63.25	20.29	13.24	3.22	96.78

表-3-9 X線回析定量値（重量パーセント）（ボーリングNo.2）

	Q	F	M	other	Q+F+M
18.0 m	37.18	20.72	27.79	14.31	85.69
18.2	27.71	19.29	35.45	17.55	82.45
18.4	31.92	15.61	36.43	16.04	83.96
18.6	32.91	13.22	34.62	19.25	80.75
18.8	31.58	16.30	35.10	17.02	82.98
19.0	29.48	15.29	50.68	4.55	95.45
19.2	25.81	11.21	64.24	/	101.26
19.4	26.96	12.58	16.44	/	105.98
19.6	25.53	13.21	63.91	/	102.65
19.8	17.29	12.11	76.96	/	106.36
20.0	49.95	18.21	15.63	16.21	83.79
20.2	30.81	16.65	50.72	1.82	98.18
20.4	26.91	14.21	58.41	0.47	99.53
20.6	14.72	14.09	75.03	/	103.44
20.8	36.03	10.02	37.83	16.02	83.88

	Q	F	M	other	Q+F+M
21.0 m	32.81	15.32	34.31	17.56	82.44
21.2	36.31	13.42	26.15	24.52	75.48
21.4	35.21	14.21	24.59	25.99	74.01
21.6	38.87	15.33	19.76	26.04	73.96
21.8	61.66	17.86	8.65	11.83	88.17
22.0	62.11	20.83	7.23	9.83	90.17
22.2	62.31	25.83	8.12	3.74	96.26
22.4	66.73	22.29	9.18	1.80	98.20
22.6	9.46	26.84	8.77	4.93	95.07
22.8	54.55	30.06	7.21	8.18	91.82
23.0	61.09	28.01	7.05	3.85	96.15
23.2	50.48	21.72	8.65	19.15	80.85
23.4	56.57	22.43	12.31	8.69	91.31
23.6	55.92	25.52	9.35	9.21	90.79
23.8	52.37	21.44	10.61	15.58	84.42

表-3・10 X線回析定量値（重量パーセント）（ボーリングNo.2）

	Q	F	M	other	Q+F+M
24.0 m	60.31	25.62	5.28	9.39	90.61
24.2	60.44	21.43	6.15	11.97	88.03
24.4	62.18	23.96	5.73	8.13	91.87
24.6	66.22	22.15	8.65	2.98	97.02
24.8	69.73	22.76	4.05	3.46	96.54

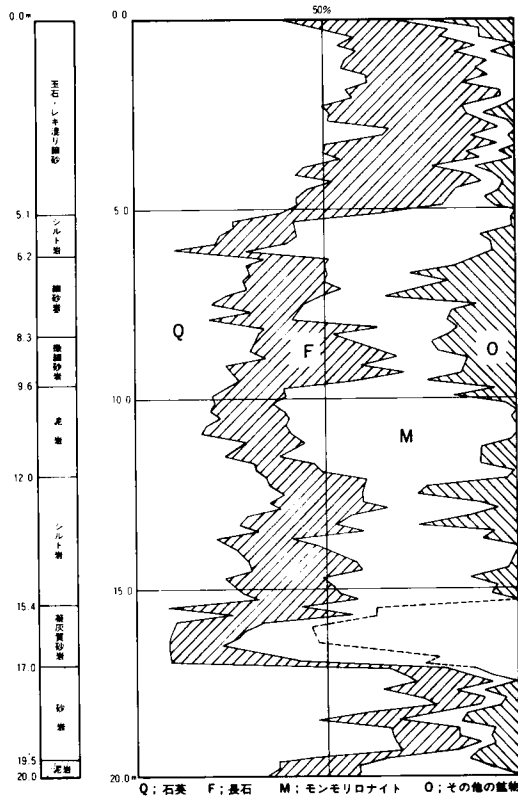


図-3・16 X線回析定量図（ボーリングNo.1）

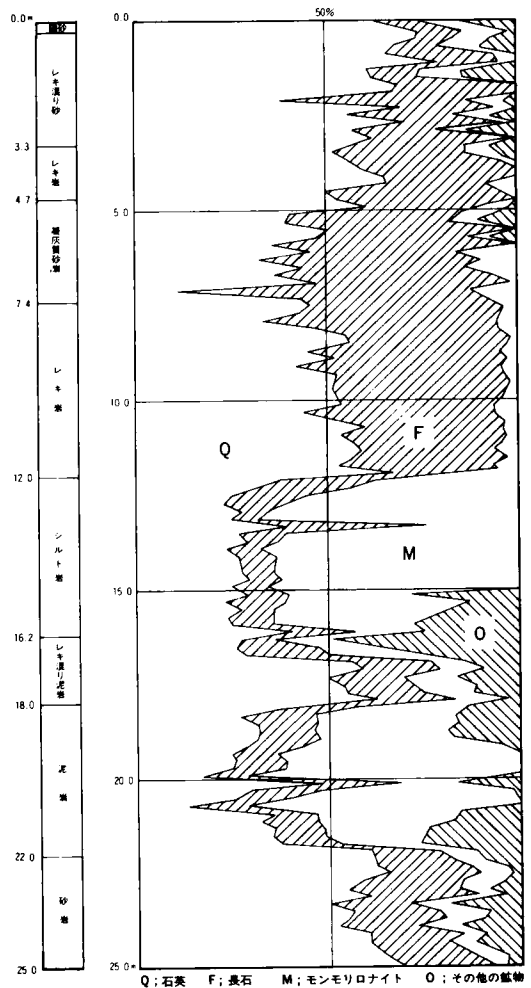


図-3・17 X線回析定量図（ボーリングNo.2）

3.3 化学組成分析

3.3.1 原理と装置

土の構成元素を把握することは、地盤の構成鉱物、溶脱状態及び風化程度などの知識を得るために不可欠の事である。しかしながら、土の化学分析は多大の労力と時間を要することから、鉱物学及び土壌学の分野に限られてきた。地すべりのように、その素因として地質学的スケールの風化や構成鉱物が問題となる場合には、土の化学分析は有効な調査手段となる。

近年、原子核実験技術の飛躍的な進歩に伴ない、蛍光X線分析法の発達が促された。本法の注目される点は、化学的に分離・検出の極めて困難な稀土類元素および重金属が容易に検出できることと、分析が迅速かつ精度が高く、分析範囲がC(6)～U(72)と非常に広いことである。

(1) 原 理

強力なX線を試料にあてると、X線の一部はそのままの波長で散乱し、一部はコンプトン散乱し、更に他の一部は物質構成元素固有のX線（蛍光X線）を発生させる。この現象は、X線によって原子の最内殻軌道K殻あるいは外側のL殻、M殻上の電子が励起され、この空位となった個所に他の軌道の電子が入り込むときに発生する。空位になった軌道と入り込む電子の軌道の組合せによって、 $K\alpha_1$ 、 $K\alpha_2$ 、 $K\beta_1$ 、 $K\beta_2$ など種々の蛍光X線が発生するが、これを分光して波長測定を行ない、どの元素に基づくものであるかを調べて定性分析、定量分析を行なうのが蛍光X線分析である。

(2) 装 置

蛍光X線分析装置の基本構成図を図-3・18に示すが、大別してX線管用高圧電源部、蛍光X線の発生・分光・検出部および計数記録部に分けられる。

i) X線管球

回析用のものと異なり、試料にできるだけ均一にX線を照射し、強いX線を得るために焦点（対陰極上において電子線が集中してX線が発生する部分）も大きく、大容量のもの

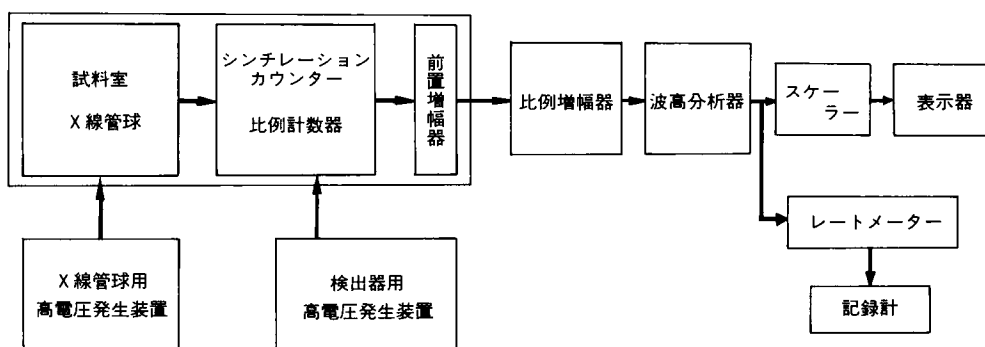


図-3・18 蛍光X線装置基本構成図

である。対陰極には、Au、W、Ag、Mo、Cr、などが用られるが、分光元素の蛍光X線と対陰極物質の固有X線が重複しないように使い分けられている。本研究ではCrを使用した。

ii) 分光結晶

試料から発生する二次X線は、試料中の種々の構成元素の固有X線を含み、また、対陰

極物質からの固有X線の試料による散乱もあるのでこれらを分離し、測定元素のX線が得られるよう分光結晶を利用して分光が行なわれる。

蛍光X線はこの分光結晶によって下式の Blagg の条件式を満足するものとして、他のものと区別して取り出される。

$$n \cdot \lambda = 2d \sin \theta$$

λ ; 蛍光X線波長

θ ; 入射角

d ; 分光結晶の格子面間隔

n ; 自然数

回析される蛍光X線の波長と分光結晶の格子面間隔との関係は

$$\frac{\lambda}{2d} = \sin \theta \leq 1$$

で $2d$ は λ より大きいことが必要である。

一方、Blagg の式を微分すると

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta \lambda} = \frac{n}{2d \cos \theta}$$

となり、 d が小さいほど、また、 n が大きいほど $\Delta \theta / \Delta \lambda$ が大きくなって分解能が上がる。以上のように、使用する分光結晶としては、目的とする元素スペクトル波長にもっとも近い格子面間隔の結晶を用いることによって高次の分解が良くなることがわかる。実験にあたっては、結晶を表-3.11のように使用した。

表-3.11 分 光 結 晶

分光結晶	LIF	EDDT	RAP
$2d$ (Å)	4.03	8.81	26.12
測定可能範囲	Ti (22) ~U (92)	Al (13) ~Ca (22)	Na (11) ~Mg (12)

iii) 検出器

蛍光X線分析における検出器には、シンチレーションカウンター (S.C) が硬X線用に (波長 3 Å 以下)、比例計数管が軟X線用 (波長 3 Å ~ 20 Å) に使用される。

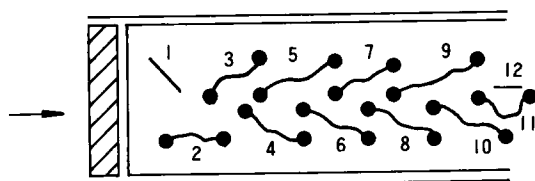


図-3.19 シンチレーションカウンター

シンチレーションカウンターを図-3.19に示す。原理はシンチレーターにX線を吸収させて、これを発光させ、光電子増倍管に受けて電圧パルスに変える。シンチレーターは微量のTiで活性化したNaI単結晶が用いられる。図-3.19におい

て1は陰極、2～11はダイノード、12は陽極である。

入射X線による発光は光電子増倍管の陰極で光電子を生じ、光電子はダイノードで 10^6 倍程度に増幅され陽極にパルスが発生する。不感能時間は $0.5\mu\text{sec}$ 以下で数え落しは少ないがパルス分布が広いので、分解能は比例計数管に比べるとよくない。

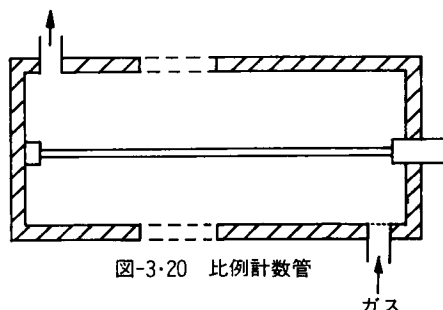


図-3・20 比例計数管

比例計数管は軽元素から発生する軟X線の検出に用いられるため、窓はできるだけ薄くしてX線が管内に入りやすいようにし、ガスを流しながら使用するガスフロ型(F.P.C.)が多く用いられる。ガスフロ型の比例計数管の構造を図-3・20に示す。不感能時間は $0.2\mu\text{sec}$ で数え落しはなく、エネルギー分散能もよい。

iv) 波高分析器

波高分析器では、検出器の出力パルスの波高が入射X線エネルギーに比例することを利用して、電氣的に分光を行なう。その基本図と原理図を図-3・21、図-3・22に示す。

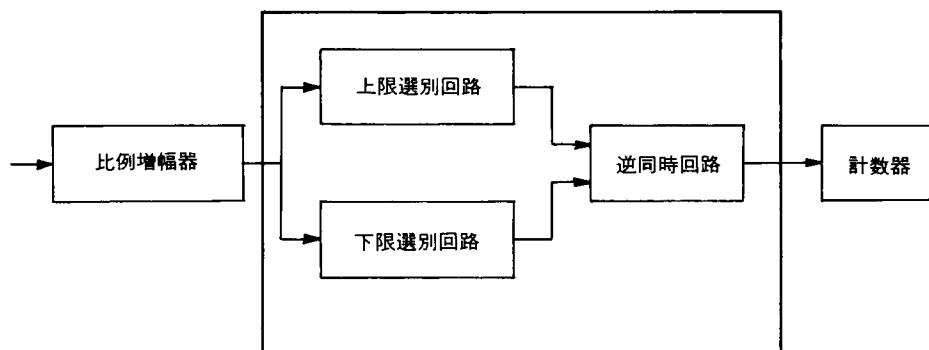


図-3・21 波高分析器の基本構成図

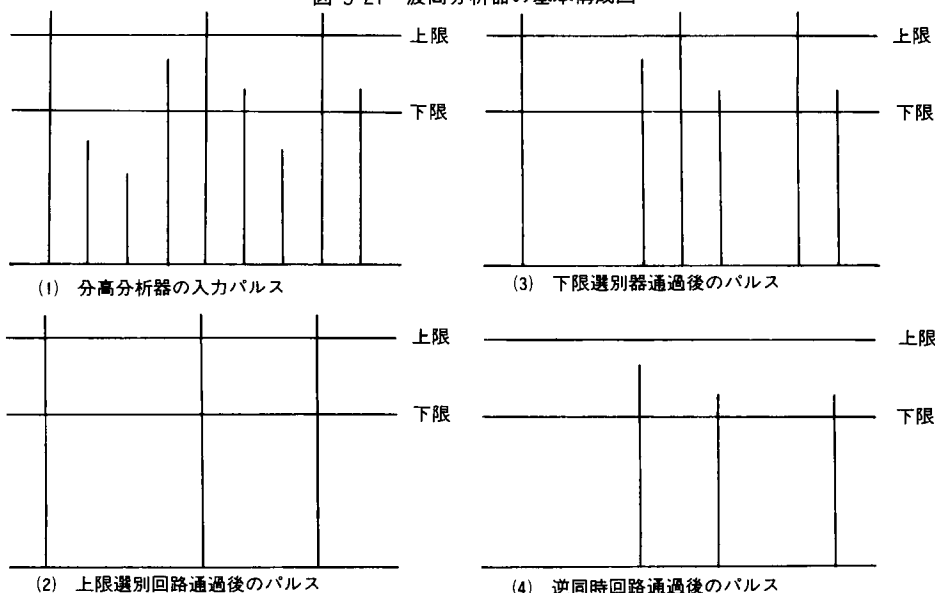


図-3・22 波高分析器の動作を示すパルスのモデル図

図-3・22(2)には上限選別器を作動した時の通過パルス、図-3・22(3)は下限選別器を作動した時の通過パルスである。よって、逆同時回路を作動させれば、一定範囲の波高パルスを図-3・22(4)のように取り出すことができるが、これは Blagg の条件式より、

$$\sin\theta = n\lambda / 2d < 1$$

で、回析次数が一定波長でいくつもとれ、波長の長い一次線に波長の短い高次線が重なる高次線妨害を除くために使用される。

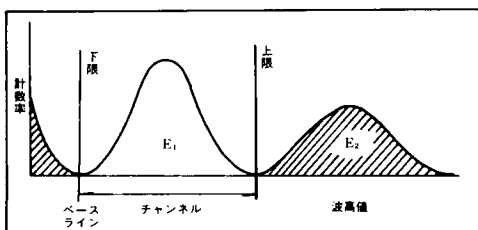


図-3・23 波高値の選択

場合、ベースライン、チャンネルウィンドを図のように設定して、E₂と分離する。

波高分析器を通過するパルスの波高値範囲をチャンネルウィンドと呼び、下限をベースラインと呼んでいるが、両者とも高範囲に調節できる。パルスの波高値は統計量で、ある分布をもつが、二つの異なるエネルギーのX線が入射した場合、図-3・23のように二つのピークとなってあらわれるが、E₁を測定する場合、

3.3.2 分析法

本研究では、定量分析と定量分析結果からノルム計算を行った。

(1) 定量分析法

i) 原理

蛍光X線強度が元素の含有量に比例することを利用するものであるが、その基礎式は、X線回析定量分析と同様に、

$$I_i = \frac{Q_i \cos\theta_1 \cdot W_i \cdot I_0}{W_i (\mu_i \cos\theta_1 + \mu'_i \cos\theta_2) + \sum_{j \neq i} W_j (\mu_j \cos\theta_1 + \mu'_j \cos\theta_2)}$$

である。

蛍光X線の場合、入射X線は連続X線と対陰極の特性X線とから成るので、厳密には、 I_0 、 Q_i 、 μ 、 μ_j は波長関数として取り扱わねばならないが、定数としてもそれ程の誤差は生じない。

イ) 吸収効果

上式を i 、 j の2成分系に適用し、() 内を a_i 、 a_j とすれば、

$$I_i = \frac{Q_i \cos\theta_1 W_i I_0}{W_i a_i + (1 - W_i) a_i}$$

となる。

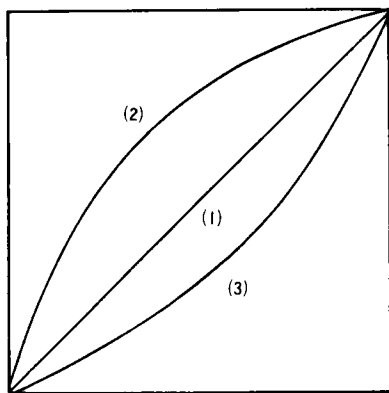


図-3-24 マトリックス効果を受けた蛍光 X線強度

これより重量濃度 W_i が同じでも a_i , a_j の違いで I_i が変化することがわかる。

(1) $a_i = a_j$ 直線

(2) $a_i > a_j$ 上に凸

(3) $a_i < a_j$ 下に凸

は図-3-24に表わすとおりである。

ロ) 励起効果

たとえば, $Al_2O_3 - SiO_2$ 系試料の $AlK\alpha$ の強度は, 吸収係数から考えれば, 下に凸になる曲線 (図-3-24,(3)) であるはずだが, 実際には上にやや凸になっている。これは試料中で同時に励起させられている $SiK\alpha$ (7.13\AA)

が AlK 吸収端よりわずかに短波長側にあって, これが Al 原子にあたるとき Al の K 殻の電子を励起させるので, $AlK\alpha$ が強くでる。このことを励起効果または強調効果と呼んでいる。

以上, (イ), (ロ)を合わせてマトリックス効果と呼ぶが, 定量分析の際はこの現象に注意しなければならない。

(2) 試料調整, 標準試料および実験方法

i) 試料調整

3.2.1と同様にして粉碎した試料の0.85 g とセルローズ5.15 g をミキサーミルで約5分間混合し, $\phi 4\text{cm}$ のアルミリングに詰め, 加圧機で15 t の圧力をかけ成型したものを試料とした。セルローズによる希釈はマトリックス効果を軽減させ, 検量線ののりをよくするためである。

ii) 標準試料と実験方法

定量方法には代表的なものとして, 内標準法, 添加法, 検量線法があるが, 本研究では検量線法を採用した。検量線の作成には表-3-12に示す構成元素の標準試料を使用し, 測定結果をもとに最小自乗法によって求めた。また, 計数値の経時変動は検量線が平行移動するものとして, 測定の際, そのつど標準試料によって補正を行った。

表-3-12 標準試料構成元素 (%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO
1	65.57	16.39	2.19	2.19	4.37	2.19	6.56	0.55
2	63.76	25.30	1.21	1.21	2.43	1.21	4.55	0.30
3	70.08	23.01	0.84	0.84	1.05	0.84	3.14	0.21
4	51.77	33.40	2.29	2.91	1.49	1.50	6.26	0.38
5	58.00	29.43	3.94	5.33	0.21	0.53	1.92	0.64
6	60.13	27.43	1.27	6.22	0.84	0.53	3.59	0.42
7	75.00	15.00	0.50	2.00	3.00	/	3.50	1.00
8	80.00	12.00	0.50	1.50	2.00	/	3.50	0.70
9	85.00	10.00	/	0.50	1.50	/	2.50	0.50
10	90.00	7.00	/	/	1.00	/	2.00	/

(3) 測定誤差

i) マトリックス効果

3.2.2 の(i)参照

ii) 粒 度

粉末試料の場合、試料面からの蛍光X線発生率を一定にするために粒度をできるだけ小

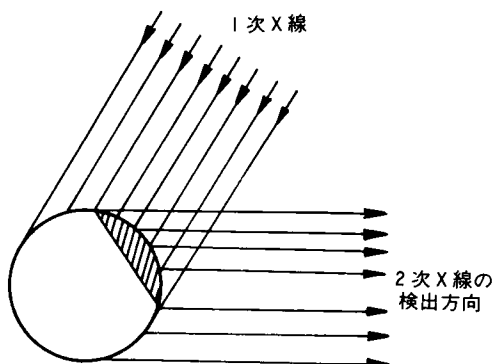


図-3・25 蛍光X線強度の粒度による影響

さく(50 μ 以下)するとよい。図-3・25に示すように、1次X線の照射を受ける部分と蛍光X線の検出される方向からX線的に見える部分が重複する斜線部で発生した蛍光X線だけが検出される。よって吸収係数が大きく、粒度の大きい試料では、重複する部分は表面に限られるため、X線強度は低下するが、粒度の小さいときは、X線は粒子の内部まで達し、重複する部分は内部までひろがるので、強度減少は少ない。

各元素の測定条件と検量線は以下のとおりである。

- 1) SiO_2 EDDT-F.P.C. 50kV-40mA, 100sec
 $2\theta=108.04^\circ$, B.L.=100, C.W.=200, gain=8.875
 $y=0.0004361x+13.39$
- 2) Al_2O_3 EDDT-F.P.C. 50kV-50mA, 20sec
 $2\theta=142.83^\circ$, B.L.=60, C.W.=260, gain=8.65
 $y=0.001598x+0.824$
- 3) Na_2O RAP-F.P.C. 50kV-50mA, 100sec
 $2\theta=52.85^\circ$, B.L.=100, C.W.=220, gain=6.4
 $y=0.00004996x-2.449$
- 4) K_2O EDDT-F.P.C. 45kV-30mA, 20sec
 $2\theta=50.23^\circ$, B.L.=120, C.W.=180, gain=7.9
 $y=0.00007503x-0.10682$
- 5) CaO EDDT-F.P.C. 30kV-20mA, 20sec
 $2\theta=44.80^\circ$, B.L.=120, C.W.=200, gain=7.8
 $y=0.0002026x-0.2801$
- 6) MgO RAP-F.P.C. 50kV-50mA, 100sec
 $2\theta=44.53^\circ$, B.L.=140, C.W.=140, gain=8.52
 $y=0.001026x-1.337$
- 7) Fe_2O_3 LIF-SC, 40kV-20mA, 20sec
 $2\theta=57.56^\circ$, B.L.=60, C.W.=300, gain=5.9
 $y=0.0000734x-7.644$
- 8) TiO_2 LIF-SC, 45kV-30mA, 40sec
 $2\theta=86.20^\circ$, B.L.=60, C.W.=280, gain=6.5
 $y=0.00001512x-0.0491$

(4) 実験結果と考察

実験結果を表-3・13～表-3・28, 図-3・26～図-3・33に示す。マトリックス効果, 試料調整および測定誤差より, total は100%とならない場合がほとんどであるが, そのまま示した。また, 鉄はすべて二酸化鉄として, H_2O は強熱減量の結果を記載している。

i) 全般的傾向

アルカリ金属の Na_2O , K_2O は風化の進行につれ溶脱を受けて減少し, アルカリ土類金属の CaO , MgO も溶脱を受けやすいが, 粘土鉱物の存在する個所では, その中に含まれることから増加を示す。また, 重金属の Fe_2O_3 , TiO_2 および, pH 5～8 では不溶性の Al_2O_3 は絶対量にほとんど変化がないため¹⁰⁾ 他の成分の溶脱が激しい風化層ほど, 含有率は増加傾向を示し, 逆に SiO_2 は減少する。以上が各元素の一般的傾向であるが, 図からもわかるように各層はこれに沿った組成を示し, レキ岩<砂岩<シルト岩<泥岩の順に風化の進行が見られる。また, 表層部は, 雨水・表面水の影響で特に CaO の溶脱が著しい。

ii) すべり面付近

イ) ボーリングNo.1

凝灰質砂岩層において CaO の急増, K_2O の急減 (図-3・27, 図-3・28参照) が見られることは明らかに他の滞積層と成因を異にしていることを示している。

ロ) ボーリングNo.2

シルト層からレキ混り泥岩層のすべり面を間にはさんで, CaO , MgO , TiO_2 , Fe_2O_3 が減少傾向になるのは, レキ混り泥岩層がレキに富むことを示している。

表-3・13 サンプル構成元素 (重量パーセント)

(ボーリングNo.1)

	Si	Al	Na	K	Ca	Mg	Fe	Ti	+H ₂ O	Total
0.0～0.2 m	78.88	11.92	0.74	5.58	0.11	0.48	1.98	0.11	1.76	101.56
0.2～0.4	75.46	13.38	0.75	4.99	0.13	0.48	1.76	0.10	2.75	99.80
0.4～0.6	73.47	13.46	0.73	5.20	0.09	0.47	1.90	0.09	2.43	97.83
0.6～0.8	75.15	13.62	0.75	4.58	0.04	0.40	1.90	1.09	2.94	99.47
0.8～1.0	73.83	14.17	0.79	4.15	0.12	0.40	2.14	0.09	2.57	98.26
1.0～1.2	75.56	11.56	0.73	4.58	0.08	0.35	1.73	0.08	2.51	97.18
1.2～1.4	75.93	12.35	0.89	4.06	0.07	0.50	1.63	0.09	2.45	97.97
1.4～1.6	75.41	13.55	0.81	5.54	0.10	0.57	2.07	0.08	2.30	100.43
1.6～1.8	74.86	12.97	0.84	6.74	0.13	0.35	2.41	0.09	2.52	100.91
1.8～2.0	74.89	13.58	0.85	4.38	0.01	0.48	2.21	0.10	2.84	99.34
2.0～2.2	75.75	13.19	0.78	4.27	0.10	0.37	1.87	0.08	2.29	98.70
2.2～2.4	75.72	13.09	0.78	5.28	0.19	0.46	1.79	0.10	2.43	99.84
2.4～2.6	72.76	14.71	0.99	6.63	0.24	0.73	2.56	0.10	2.35	101.07
2.6～2.8	73.21	12.94	0.83	5.62	0.18	0.58	2.43	0.12	2.52	98.43
2.8～3.0	75.29	12.56	0.84	3.82	0.10	0.29	1.89	0.09	3.29	98.17

Si = SiO_2 Al = Al_2O_3 Na = Na_2O K = K_2O Ca = CaO Mg = MgO Fe = Fe_2O_3
Ti = TiO_2

表-3-14 サンプル構成元素（重量パーセント）

（ボーリングNo.1）

	Si	Al	Na	K	Ca	Mg	Fe	Ti	+H ₂ O	Total
3.0~3.2 m	72.74	14.41	0.91	6.83	0.01	0.59	1.72	0.11	2.61	98.93
3.2~3.4	74.67	13.21	0.94	4.50	0.10	0.44	2.35	0.10	2.33	98.64
3.4~3.6	74.80	13.94	0.84	5.33	0.10	0.44	2.40	0.11	2.65	100.61
3.6~3.8	75.22	13.70	0.96	4.08	0.09	0.37	2.25	0.09	2.43	99.19
3.8~4.0	75.93	13.89	0.92	4.65	0.02	0.37	1.80	0.13	2.48	100.19
4.0~4.2	75.07	12.89	0.88	4.41	0.02	0.46	1.77	0.08	2.10	97.68
4.2~4.4	75.07	12.05	0.91	4.09	0.13	0.34	1.92	0.07	1.65	96.23
4.4~4.6	76.10	11.49	0.89	4.64	0.12	0.34	1.99	0.09	1.43	97.09
4.6~4.8	73.88	12.66	0.97	4.52	0.11	0.38	1.98	0.09	1.96	96.55
4.8~5.0	73.46	12.64	0.94	3.75	0.17	0.35	1.90	0.07	1.51	94.89
5.0~5.2	66.80	14.99	1.18	2.74	0.94	0.39	4.78	0.37	4.99	97.18
5.2~5.4	63.89	14.68	1.24	2.52	0.97	0.53	6.53	0.47	4.46	95.29
5.4~5.6	62.37	15.81	1.27	2.28	1.04	0.42	5.87	0.49	5.85	95.40
5.6~5.8	63.17	14.49	1.26	2.31	0.96	0.52	6.17	0.50	6.40	95.78
5.8~6.0	60.07	14.75	1.55	2.43	0.93	0.57	7.20	0.49	0.11	98.10

表-3-15 サンプル構成元素（重量パーセント）

（ボーリングNo.1）

	Si	Al	Na	K	Ca	Mg	Fe	Ti	+H ₂ O	Total
6.0~6.2 m	64.65	14.82	1.19	2.25	0.97	0.43	4.52	0.45	6.17	95.45
6.2~6.4	62.05	13.58	1.20	2.29	0.99	0.63	4.76	0.42	9.40	94.98
6.4~6.6	64.07	14.82	1.16	2.49	1.01	0.62	3.89	0.45	4.83	93.34
6.6~6.8	65.48	14.28	1.09	2.55	0.99	0.63	3.71	0.41	5.17	94.31
6.8~7.0	64.59	14.74	1.09	2.58	0.94	0.59	3.67	0.39	4.72	91.31
7.0~7.2	65.45	14.66	1.13	2.71	0.98	0.56	2.80	0.38	4.09	92.76
7.2~7.4	64.60	14.76	1.11	2.73	0.96	0.66	3.15	0.39	4.42	92.78
7.4~7.6	64.91	15.17	1.03	2.39	0.96	0.41	2.92	0.37	4.08	92.24
7.6~7.8	67.40	14.69	1.10	3.00	1.04	0.67	3.08	0.43	4.23	96.11
7.8~8.0	65.45	14.82	1.08	2.54	1.02	0.57	3.35	0.42	4.54	93.79
8.0~8.2	65.99	15.03	1.92	2.65	1.08	0.57	3.37	0.48	4.61	94.70
8.2~8.4	68.24	13.39	1.16	2.86	1.10	0.63	3.38	0.43	4.90	96.09
8.4~8.6	68.76	13.81	0.88	3.35	1.10	0.56	3.40	0.39	4.89	97.14
8.6~8.8	69.28	11.68	0.84	3.60	1.08	0.65	2.46	0.34	3.19	93.11
8.8~9.0	67.58	12.72	0.91	3.40	1.08	0.58	2.42	0.36	3.42	92.47

表-3-16 サンプル構成元素 (重量パーセント)

(ボーリングNo.1)

	Si	Al	Na	K	Ca	Mg	Fe	Ti	+H ₂ O	Total
9.0～9.2 m	70.63	11.60	0.83	3.69	1.07	0.61	2.85	0.33	2.92	94.53
9.2～9.4	72.11	12.47	0.91	3.72	1.06	0.57	3.24	0.33	2.97	97.38
9.4～9.6	69.24	12.32	0.88	3.45	1.08	0.67	2.35	0.35	3.19	93.53
9.6～9.8	65.79	14.81	0.93	2.50	1.09	0.60	3.46	0.47	5.02	94.12
9.8～9.0	64.84	14.22	1.04	2.22	1.12	0.59	3.87	0.47	5.47	93.84
10.0～10.2	62.46	15.02	1.02	1.99	1.26	0.54	4.29	0.33	5.45	92.36
10.2～10.4	62.15	15.96	1.12	2.19	1.21	0.64	4.28	0.49	4.83	92.87
10.4～10.6	63.33	15.24	1.05	2.48	1.18	0.62	4.34	0.49	5.70	94.44
10.6～10.8	62.04	15.90	0.98	2.22	1.16	0.56	4.65	0.49	4.86	92.86
10.8～11.0	62.37	15.43	1.32	1.69	1.20	0.53	5.97	0.49	5.19	94.19
11.0～11.2	62.62	17.45	1.18	3.25	1.07	0.85	4.85	0.53	6.42	98.22
11.2～11.4	65.34	15.46	1.20	3.15	1.04	0.72	4.75	0.50	6.12	98.29
11.4～11.6	61.90	15.22	1.34	2.55	1.27	0.82	5.54	0.62	6.59	95.85
11.6～11.8	62.16	15.03	1.26	3.52	1.02	0.66	5.34	0.51	6.30	95.80
11.8～12.0	64.96	15.43	1.22	3.29	1.04	0.70	5.80	0.49	6.28	99.21

表-3-17 サンプル構成元素 (重量パーセント)

(ボーリングNo.1)

	Si	Al	Na	K	Ca	Mg	Fe	Ti	+H ₂ O	Total
12.0～12.2 m	64.15	14.30	1.21	2.72	0.86	0.47	5.78	0.43	5.87	95.73
12.2～12.4	64.10	14.67	1.38	3.44	1.03	0.75	6.41	0.46	6.80	99.04
12.4～12.6	63.13	14.91	1.31	3.35	0.88	0.73	6.05	0.46	5.31	96.13
12.6～12.8	64.58	14.89	1.33	3.00	0.86	0.76	5.78	0.46	5.70	97.36
12.8～13.0	63.28	14.57	1.19	3.67	0.98	0.67	5.37	0.48	4.78	93.09
13.0～13.2	66.09	14.25	1.31	3.64	0.98	0.86	5.64	0.44	5.18	98.39
13.2～13.4	63.29	14.61	1.22	3.75	0.90	0.69	5.79	0.47	5.40	96.12
13.4～13.6	63.39	14.85	1.32	3.33	0.85	0.87	5.88	0.48	5.17	96.14
13.6～13.8	61.44	14.29	1.27	3.16	1.15	0.81	6.11	0.48	4.84	93.55
13.8～14.0	64.62	14.64	1.33	2.92	1.16	0.78	6.05	0.47	5.09	97.06
14.0～14.2	64.89	16.72	1.29	2.97	1.13	0.77	5.13	0.47	4.74	98.11
14.2～14.4	63.70	18.12	1.33	3.21	1.16	0.77	5.70	0.46	4.80	99.25
14.4～14.6	62.08	17.51	1.29	3.14	1.08	0.88	5.19	0.44	5.01	96.62
14.6～14.8	64.44	16.92	1.28	3.06	1.11	0.75	4.96	0.45	4.89	97.85
14.8～15.0	60.00	18.29	1.27	3.24	1.11	0.81	4.98	0.48	5.26	95.44

表-3・18 サンプル構成元素（重量パーセント）

（ボーリングNo.1）

	Si	Al	Na	K	Ca	Mg	Fe	Ti	+H ₂ O	Total
15.0～15.2 m	62.42	18.34	1.36	3.31	0.95	0.82	5.30	0.44	5.74	98.68
15.2～15.4	64.25	17.51	1.28	3.29	1.09	0.83	4.83	0.45	4.60	98.13
15.4～15.6	60.33	19.83	1.10	0.51	2.50	0.82	3.39	0.16	5.48	94.12
15.6～15.8	73.86	14.43	1.02	2.36	1.31	0.61	2.77	0.27	4.07	100.70
15.8～16.0	71.85	14.46	1.11	1.02	1.88	0.67	3.50	0.18	4.49	99.16
16.0～16.2	70.04	15.60	1.07	0.99	2.05	0.70	3.04	0.17	4.93	98.59
16.2～16.4	71.89	15.92	1.08	0.78	2.08	0.89	2.94	0.18	5.06	100.82
16.4～16.6	69.52	15.49	0.88	0.70	1.79	0.51	1.55	0.16	5.17	95.77
16.6～16.8	70.78	17.17	1.12	0.32	2.47	0.86	2.61	0.18	4.79	100.30
16.8～17.0	71.12	15.70	1.11	0.70	2.05	0.70	2.63	0.16	5.52	99.69
17.0～17.2	78.51	11.54	0.86	3.32	0.44	0.49	1.15	0.18	2.67	99.16
17.2～17.4	81.12	9.710	0.94	3.87	0.31	0.47	1.07	0.16	2.34	100.07
17.4～17.6	80.82	9.810	0.88	3.37	0.26	0.39	1.12	0.13	2.29	99.07
17.6～17.8	90.18	9.630	0.82	3.31	0.25	0.39	1.01	0.11	1.88	97.58
17.8～18.0	82.00	10.13	0.83	3.63	0.07	0.38	0.71	0.14	1.79	99.68

表-3・19 サンプル構成元素（重量パーセント）

（ボーリングNo.1）

	Si	Al	Na	K	Ca	Mg	Fe	Ti	+H ₂ O	Total
18.0～18.2 m	81.62	10.07	0.83	3.71	0.16	0.33	0.76	.0.15	1.69	99.32
18.2～18.4	80.14	10.42	0.82	3.51	0.21	0.36	0.93	.0.16	2.05	98.60
18.4～18.6	74.08	13.89	0.98	3.42	0.58	0.49	2.53	.0.22	3.69	99.83
18.6～18.8	78.76	11.45	0.82	3.49	0.20	0.49	0.84	.0.17	2.19	98.41
18.8～19.0	76.21	11.82	0.79	3.69	0.19	0.38	0.81	.0.15	3.33	97.37
19.0～19.2	79.05	11.27	0.77	4.00	0.11	0.28	0.78	.0.13	1.85	98.28
19.2～19.4	79.87	12.33	0.88	3.78	0.11	0.40	1.05	.0.10	1.80	100.32
19.4～19.6	72.10	14.58	1.05	3.53	0.57	0.54	2.94	0.22	3.63	99.16
19.6～19.8	65.76	17.16	1.25	3.44	0.92	0.63	4.61	0.33	6.44	100.54
19.8～20.0	60.21	17.18	1.31	3.31	1.10	0.69	5.21	0.61	4.58	94.20

表-3-20 サンプル構成元素 (重量パーセント)

(ボーリングNo.2)

	Si	Al	Na	K	Ca	Mg	Fe	Ti	+H ₂ O	Total
0.0~0.2 m	71.91	17.91	0.71	2.91	0.06	0.33	3.21	0.23	5.23	102.50
0.2~0.4	70.18	15.68	0.70	3.23	0.03	0.44	3.37	0.23	6.76	101.62
0.4~0.6	74.98	14.04	0.62	3.32	0.01	0.42	2.76	0.20	5.14	101.50
0.6~0.8	73.31	14.95	0.69	3.48	0.01	0.54	2.82	0.18	6.08	102.06
0.8~1.0	73.10	13.55	0.60	5.51	0.06	0.38	2.26	0.09	3.43	98.98
1.0~1.2	74.55	14.47	0.56	4.37	0.01	0.35	1.85	0.10	4.03	109.29
1.2~1.4	73.01	14.78	0.70	4.36	0.10	0.46	2.71	0.13	4.23	109.48
1.4~1.6	70.07	17.31	0.68	4.76	0.09	0.45	3.42	0.13	5.44	102.35
1.6~1.8	73.58	12.31	0.68	5.08	0.02	0.53	2.07	0.08	3.82	98.17
1.8~2.0	75.24	14.03	0.61	5.68	0.04	0.47	2.31	0.08	2.99	101.45
2.0~2.2	73.29	13.77	0.62	4.72	0.19	0.44	2.39	0.11	3.38	98.91
2.2~2.4	74.84	14.16	0.65	5.51	0.10	0.52	2.82	0.09	3.46	102.15
2.4~2.6	72.62	12.11	0.65	6.33	0.20	0.48	2.62	0.08	3.03	98.14
2.6~2.8	76.45	12.80	0.63	5.33	0.12	0.48	2.40	0.09	3.19	101.49
2.8~3.0	71.12	13.71	0.71	5.38	0.12	0.42	3.18	0.08	4.04	98.76

Si = SiO₂Al = Al₂O₃Na = Na₂OK = K₂O

Ca = CaO

Mg = MgO

Fe = Fe₂O₃Ti = TiO₂

表-3-21 サンプル構成元素 (重量パーセント)

(ボーリングNo.2)

	Si	Al	Na	K	Ca	Mg	Fe	Ti	+H ₂ O	Total
3.0~3.2 m	75.26	14.95	0.51	4.48	0.03	0.48	2.93	0.08	2.86	102.58
3.2~3.4	76.13	13.28	0.60	5.06	0.04	0.41	3.28	0.10	2.81	101.71
3.4~3.6	77.39	13.66	0.65	4.55	0.02	0.43	2.92	0.08	2.97	102.67
3.6~3.8	71.56	14.30	0.69	4.70	0.08	0.42	3.66	0.08	3.31	98.80
3.8~4.0	76.36	13.11	0.57	4.63	0.08	0.31	3.24	0.07	2.42	100.79
4.0~4.2	75.21	13.53	0.64	4.52	0.08	0.45	2.84	0.07	2.71	100.11
4.2~4.4	76.40	12.96	0.67	5.81	0.17	0.51	1.91	0.09	0.22	100.74
4.4~4.6	73.10	13.60	0.59	4.38	0.05	0.41	2.67	0.08	0.62	96.99
4.6~4.8	72.98	12.53	0.57	4.31	0.08	0.38	3.19	0.07	2.58	96.69
4.8~5.0	73.63	14.79	0.58	5.07	0.08	0.45	2.56	0.09	2.08	99.33
5.0~5.2	72.48	14.80	0.64	4.61	0.11	0.42	2.78	0.14	3.26	99.24
5.2~5.4	70.33	15.20	0.93	5.94	0.22	0.70	4.50	0.14	3.91	101.87
5.4~5.6	73.51	14.01	0.81	5.00	0.20	0.52	3.78	0.12	2.51	100.46
5.6~5.8	72.93	15.97	0.70	4.85	0.11	0.55	2.42	0.09	2.95	100.57
5.8~6.0	73.53	15.48	0.68	3.54	0.19	0.56	2.78	0.10	3.24	100.10

表-3-22 サンプル構成元素（重量パーセント）

（ボーリングNo.2）

	Si	Al	Na	K	Ca	Mg	Fe	Ti	+H ₂ O	Total
6.0～6.2 m	74.83	14.29	0.62	5.12	0.17	0.59	1.94	0.09	2.12	99.67
6.2～6.4	70.12	15.29	0.80	5.35	0.26	0.68	3.96	0.11	2.78	99.35
6.4～6.6	72.15	14.04	0.72	5.20	0.24	0.58	2.62	0.09	2.38	98.02
6.6～6.8	72.28	14.98	0.77	5.19	0.24	0.55	3.47	0.10	2.83	100.41
6.8～7.0	73.53	15.85	0.79	5.27	0.24	0.61	2.64	0.10	2.49	101.52
7.0～7.2	68.77	16.88	0.73	4.03	0.34	0.67	3.44	0.14	3.44	98.44
7.2～7.4	75.38	14.84	0.77	4.70	0.20	0.49	2.59	0.10	2.53	101.40
7.4～7.6	78.64	14.39	0.73	4.20	0.21	0.44	2.05	0.08	1.80	102.54
7.6～7.8	74.48	14.96	0.81	5.18	0.21	0.55	2.98	0.11	2.11	101.39
7.8～8.0	74.46	15.05	0.79	4.92	0.22	0.52	2.61	0.10	2.69	101.36
8.0～8.2	75.10	14.16	0.78	4.36	0.28	0.52	2.15	0.08	2.21	99.64
8.2～8.4	76.17	14.88	0.73	4.66	0.14	0.43	2.02	0.09	2.64	101.76
8.4～8.6	75.38	13.80	0.71	4.26	0.16	0.33	2.02	0.08	1.76	98.50
8.6～8.8	77.92	14.16	0.68	4.44	0.17	0.35	1.92	0.09	2.31	101.94
8.8～9.0	75.52	15.77	0.77	5.02	0.26	0.51	2.31	0.08	2.58	102.82

表-3-23 サンプル構成元素（重量パーセント）

（ボーリングNo.2）

	Si	Al	Na	K	Ca	Mg	Fe	Ti	+H ₂ O	Total
9.0～ 9.2 m	73.86	13.20	0.72	4.40	0.14	0.33	1.65	0.08	2.08	96.46
9.2～ 9.4	74.35	13.91	0.78	4.50	0.15	0.37	1.86	0.08	2.06	98.06
9.4～ 9.6	78.52	13.38	0.74	4.45	0.13	0.37	2.01	0.07	2.20	101.87
9.6～ 9.8	76.68	14.10	0.79	4.56	0.12	0.44	2.16	0.08	2.08	101.01
9.8～10.0	74.01	13.97	0.83	4.48	0.14	0.39	2.46	0.08	2.07	98.43
10.0～10.2	75.82	14.42	0.79	4.51	0.27	0.50	2.23	0.08	2.06	100.69
10.2～10.4	72.74	14.16	0.78	4.22	0.25	0.39	2.18	0.08	2.16	96.96
10.4～10.6	76.84	14.48	0.76	4.59	0.13	0.44	2.08	0.07	1.77	101.16
10.6～10.8	78.02	13.40	0.81	4.30	0.21	0.40	2.64	0.06	1.78	101.66
10.8～11.0	75.68	13.25	0.65	3.92	0.19	0.30	2.08	0.05	1.81	97.93
11.0～11.2	78.40	12.74	0.72	4.53	0.17	0.29	2.33	0.07	1.85	101.10
11.2～11.4	75.82	12.78	0.83	4.06	0.20	0.34	2.38	0.08	1.90	98.39
11.4～11.6	74.65	14.00	0.84	3.62	0.40	0.33	2.79	0.11	2.16	98.90
11.6～11.8	75.67	13.78	0.74	3.49	0.24	0.20	2.38	0.06	1.93	98.68
11.8～12.0	77.84	13.83	0.79	2.12	0.42	0.18	2.73	0.07	1.87	99.85

表-3-24 サンプル構成元素 (重量パーセント)

(ボーリングNo.2)

	Si	Al	Na	K	Ca	Mg	Fe	Ti	+H ₂ O	Total
12.0~12.2 m	65.94	18.53	0.92	3.78	1.00	0.69	5.12	0.34	5.17	101.49
12.2~12.4	67.06	15.39	0.83	2.97	0.90	0.47	4.44	0.32	4.75	97.13
12.4~12.6	66.58	16.21	1.25	2.64	1.31	0.71	6.16	0.43	6.03	101.32
12.6~12.8	62.01	17.88	1.21	2.62	1.32	0.76	6.84	0.52	6.10	99.26
12.8~13.0	62.01	18.19	1.04	2.51	1.32	0.73	6.92	0.56	5.95	99.23
13.0~13.2	62.08	19.42	1.31	2.21	1.39	0.67	6.56	0.55	6.54	101.63
13.2~13.4	70.98	15.44	1.13	3.02	0.93	0.92	4.16	0.32	3.82	100.72
13.4~13.6	63.53	19.50	1.26	2.72	1.41	0.90	5.71	0.50	6.28	100.81
13.6~13.8	62.14	17.14	1.28	2.74	1.41	0.81	5.61	0.51	5.34	96.98
13.8~14.0	62.52	17.36	1.29	2.66	1.41	0.82	5.54	0.50	5.55	97.70
14.0~14.2	64.20	17.24	1.34	2.66	1.32	0.88	5.50	0.51	5.45	99.10
14.2~14.4	62.00	18.15	1.25	2.77	1.38	0.72	5.55	0.54	5.86	98.22
14.4~14.6	60.63	18.41	1.24	2.66	1.33	0.79	5.46	0.51	6.57	97.60
14.6~14.8	60.22	18.45	1.19	2.78	1.31	0.83	5.67	0.52	6.33	97.30
14.8~15.0	63.18	18.42	1.24	2.89	1.38	0.84	5.67	0.53	6.07	100.22

表-3-25 サンプル構成元素 (重量パーセント)

(ボーリングNo.2)

	Si	Al	Na	K	Ca	Mg	Fe	Ti	+H ₂ O	Total
15.0~15.2 m	65.14	22.74	0.99	2.89	1.14	0.56	4.31	0.28	7.96	106.01
15.2~15.4	65.96	18.94	1.27	2.51	1.23	0.62	5.04	0.38	6.71	102.66
15.4~15.6	64.83	17.35	1.21	2.49	1.11	0.51	4.74	0.32	6.36	98.92
15.6~15.8	65.60	18.82	1.19	4.44	1.22	0.71	4.69	0.37	6.10	103.14
15.8~16.0	67.76	17.56	1.11	2.60	1.24	0.67	4.41	0.33	5.84	101.52
16.0~16.2	66.25	12.36	0.88	2.86	0.58	0.43	1.93	0.14	3.23	88.54
16.2~16.4	67.58	18.96	1.10	2.78	0.95	0.54	3.04	0.21	5.83	100.99
16.4~16.6	68.68	15.85	0.99	2.71	0.71	0.44	2.55	0.20	4.70	96.83
16.6~16.8	64.68	15.36	1.08	2.61	0.81	0.51	2.32	0.18	4.65	92.20
16.8~17.0	74.91	11.26	0.95	3.00	0.31	0.27	1.22	0.08	4.65	96.65
17.0~17.2	79.38	13.31	0.87	3.07	0.47	0.36	1.45	0.13	2.99	102.03
17.2~17.4	74.09	12.84	1.06	3.06	0.46	0.45	1.59	0.14	2.98	96.67
17.4~17.6	75.30	13.03	1.04	2.57	0.50	0.28	1.67	0.12	2.51	97.02
17.6~17.8	71.87	13.32	1.06	2.65	0.48	0.33	1.65	0.12	2.27	93.75
17.8~18.0	74.97	13.70	1.03	3.27	0.43	0.36	1.62	0.14	2.55	94.47

表-3-26 サンプル構成元素 (重量パーセント)

(ボーリングNo.2)

	Si	Al	Na	K	Ca	Mg	Fe	Ti	+H ₂ O	Total
18.0~18.2 m	64.51	17.07	1.23	3.12	1.00	0.76	4.21	0.30	5.25	97.45
18.2~18.4	66.81	17.23	1.07	3.19	1.00	0.53	4.21	0.30	5.22	99.56
18.4~18.6	70.01	17.60	1.30	3.25	0.98	0.57	4.07	0.30	4.82	102.90
18.6~18.8	67.90	17.58	1.30	3.26	0.97	0.62	4.18	0.30	5.28	101.39
18.8~19.0	67.00	17.16	1.28	3.14	1.01	0.57	4.63	0.30	5.29	100.38
19.0~19.2	64.55	18.27	1.37	2.98	1.39	0.80	5.38	0.37	5.61	100.72
19.2~19.4	65.29	17.10	1.31	2.52	1.41	0.69	4.66	0.37	4.67	98.02
19.4~19.6	63.86	17.89	1.27	2.39	1.37	0.68	4.58	0.34	3.95	96.33
19.6~19.8	65.26	17.04	1.36	2.39	1.67	0.64	4.60	0.37	4.80	98.13
19.8~20.0	60.72	18.42	1.35	1.51	1.89	0.61	4.38	0.39	3.99	93.54
20.0~20.2	74.26	16.80	1.11	3.47	0.67	0.50	2.32	0.23	3.30	102.66
20.2~20.4	61.50	18.36	1.18	2.33	0.83	0.38	3.35	0.21	5.10	93.24
20.4~20.6	65.32	18.58	1.29	2.79	1.08	0.57	3.81	0.36	4.00	97.80
20.6~20.8	63.57	18.26	1.22	3.32	1.00	0.59	3.69	0.30	4.93	96.88
20.8~21.0	63.28	15.30	1.25	1.36	2.56	0.68	4.49	0.54	5.94	95.40

表-3-27 サンプル構成元素 (重量パーセント)

(ボーリングNo.2)

	Si	Al	Na	K	Ca	Mg	Fe	Ti	+H ₂ O	Total
21.0~21.2 m	64.77	16.82	1.19	3.40	0.79	0.51	3.34	0.21	5.19	96.22
21.2~21.4	65.38	16.42	1.03	2.57	0.74	0.39	3.42	0.17	4.61	94.73
21.4~21.6	65.67	18.39	1.18	3.11	0.78	0.48	3.14	0.18	5.12	98.05
21.6~21.8	64.96	18.23	1.13	3.28	0.71	0.57	2.45	0.18	5.15	96.66
21.8~22.0	73.10	14.55	1.05	3.23	0.39	0.33	1.64	0.15	3.53	97.97
22.0~22.2	79.26	12.60	0.96	3.73	0.22	0.30	1.23	0.17	2.57	101.04
22.2~22.4	75.74	12.57	0.99	3.27	0.22	0.30	1.32	0.12	2.30	96.83
22.4~22.6	76.49	12.03	0.90	3.56	0.25	0.31	1.39	0.16	1.74	96.83
22.6~22.8	76.91	13.58	0.94	3.71	0.25	0.35	1.44	0.16	2.63	99.97
22.8~23.0	76.39	12.75	1.04	3.42	0.27	0.66	1.99	0.16	3.14	99.82
23.0~23.2	77.80	12.81	1.10	3.17	0.22	0.37	1.52	0.15	3.41	100.55
23.2~23.4	76.54	12.74	1.06	3.26	0.30	0.38	1.80	0.25	3.73	100.06
23.4~23.6	78.63	12.68	1.04	3.79	0.37	0.49	1.72	0.27	3.42	102.41
23.6~23.8	78.27	13.61	1.10	3.24	0.26	0.37	1.66	0.15	2.54	101.20
23.8~24.0	71.44	15.56	1.00	3.04	0.31	0.32	1.70	0.21	3.62	97.20

表-3・28 サンプル構成元素 (重量パーセント)

(ボーリングNo.2)

	Si	Al	Na	K	Ca	Mg	Fe	Ti	+H ₂ O	Total
24.0~24.2 ^m	79.18	11.32	1.00	3.74	0.01	0.47	1.27	0.18	2.00	99.17
24.2~24.4	79.15	13.25	0.93	3.80	0.30	0.32	1.06	0.15	1.46	100.42
24.4~24.6	80.02	11.71	0.98	2.94	0.14	0.36	1.66	0.17	2.12	100.01
24.6~24.8	80.59	10.99	1.03	2.91	0.15	0.29	1.06	0.14	1.61	98.77
24.8~25.0	79.67	11.15	0.96	3.73	0.14	0.38	1.07	0.17	1.71	98.98

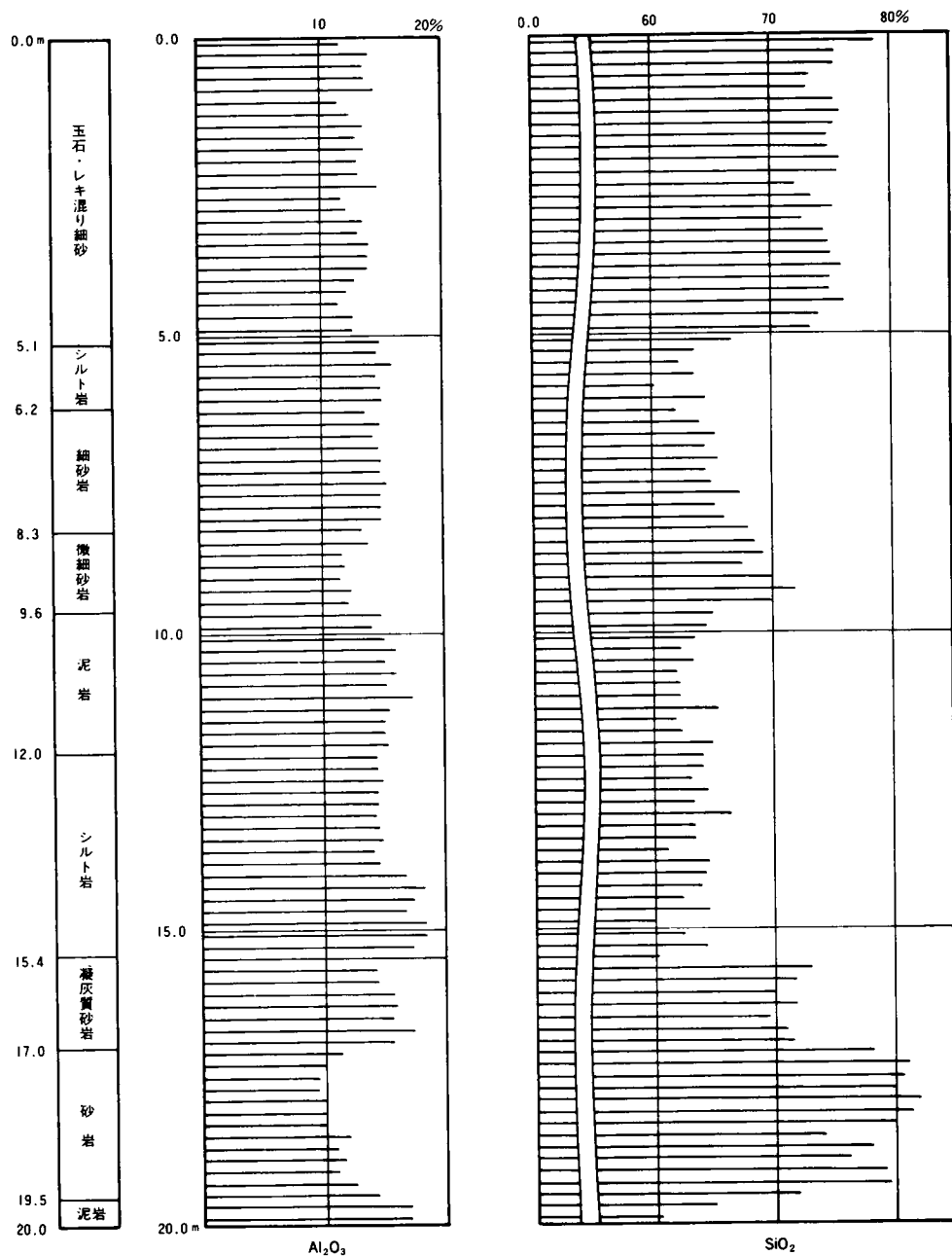


図-3-26 Al_2O_3 , SiO_2 の定量図 (ボーリングNo.1)

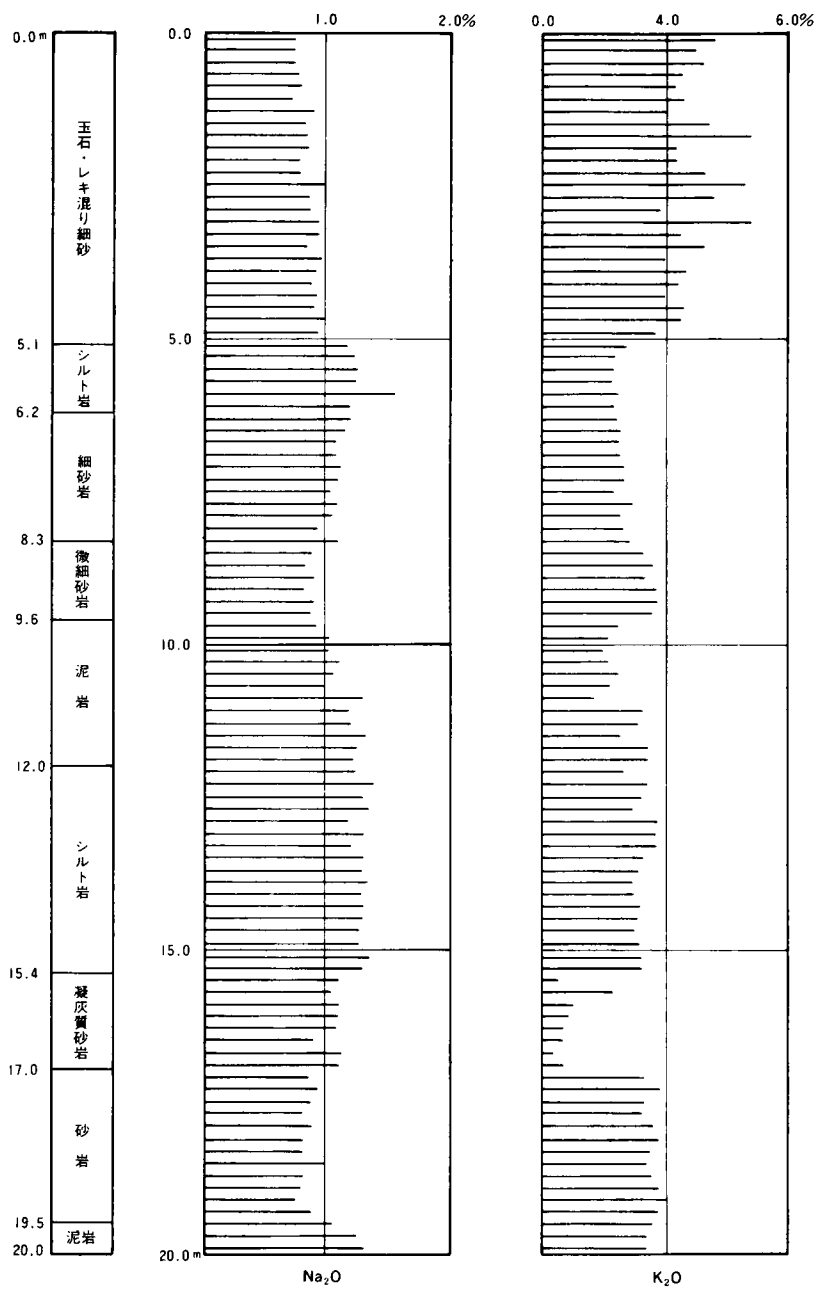


図-3-27 Na₂O, K₂O定量図 (ボーリングNo.1)

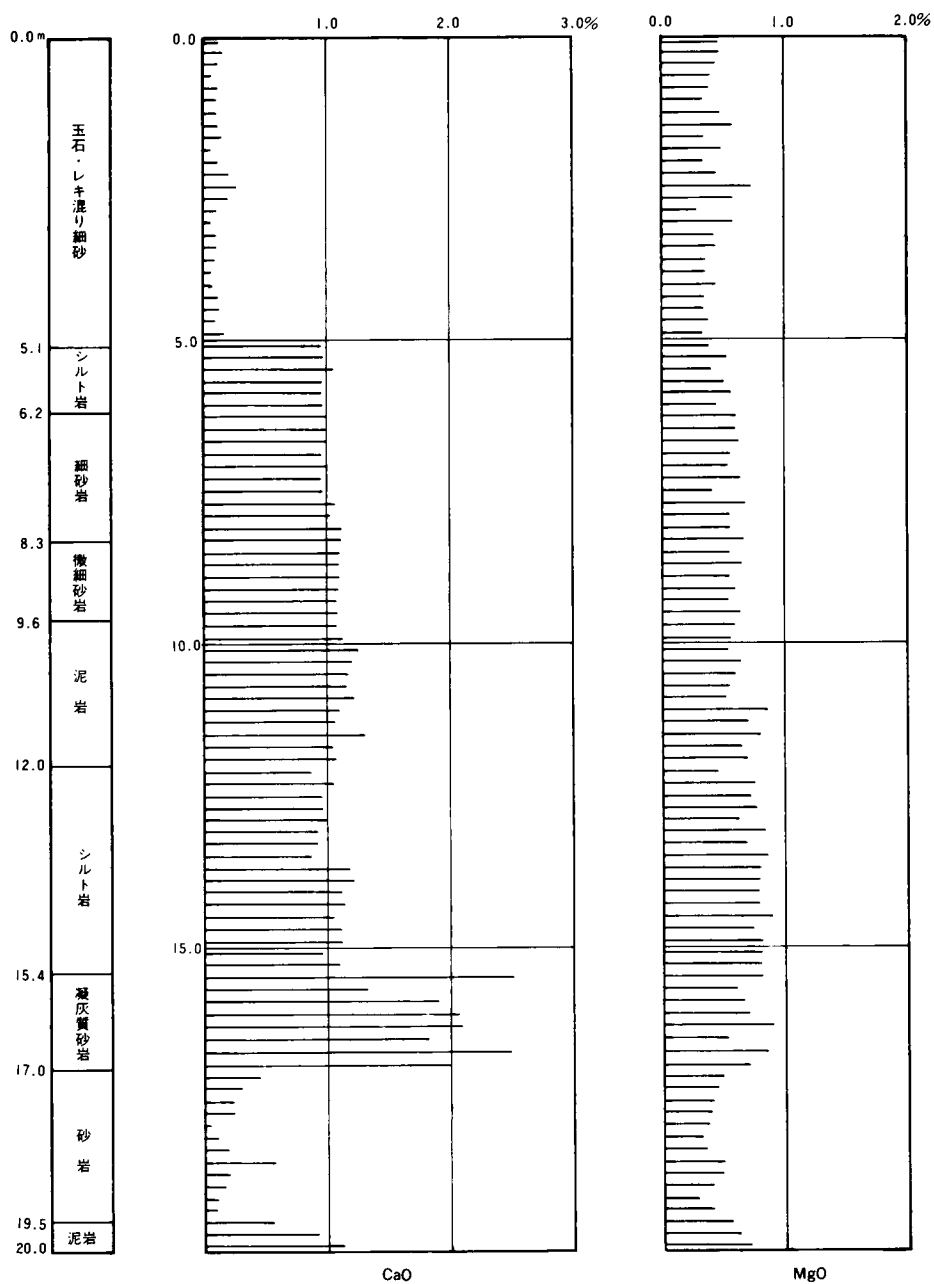


図-3-28 CaO, MgO 定量図 (ボーリングNo.1)

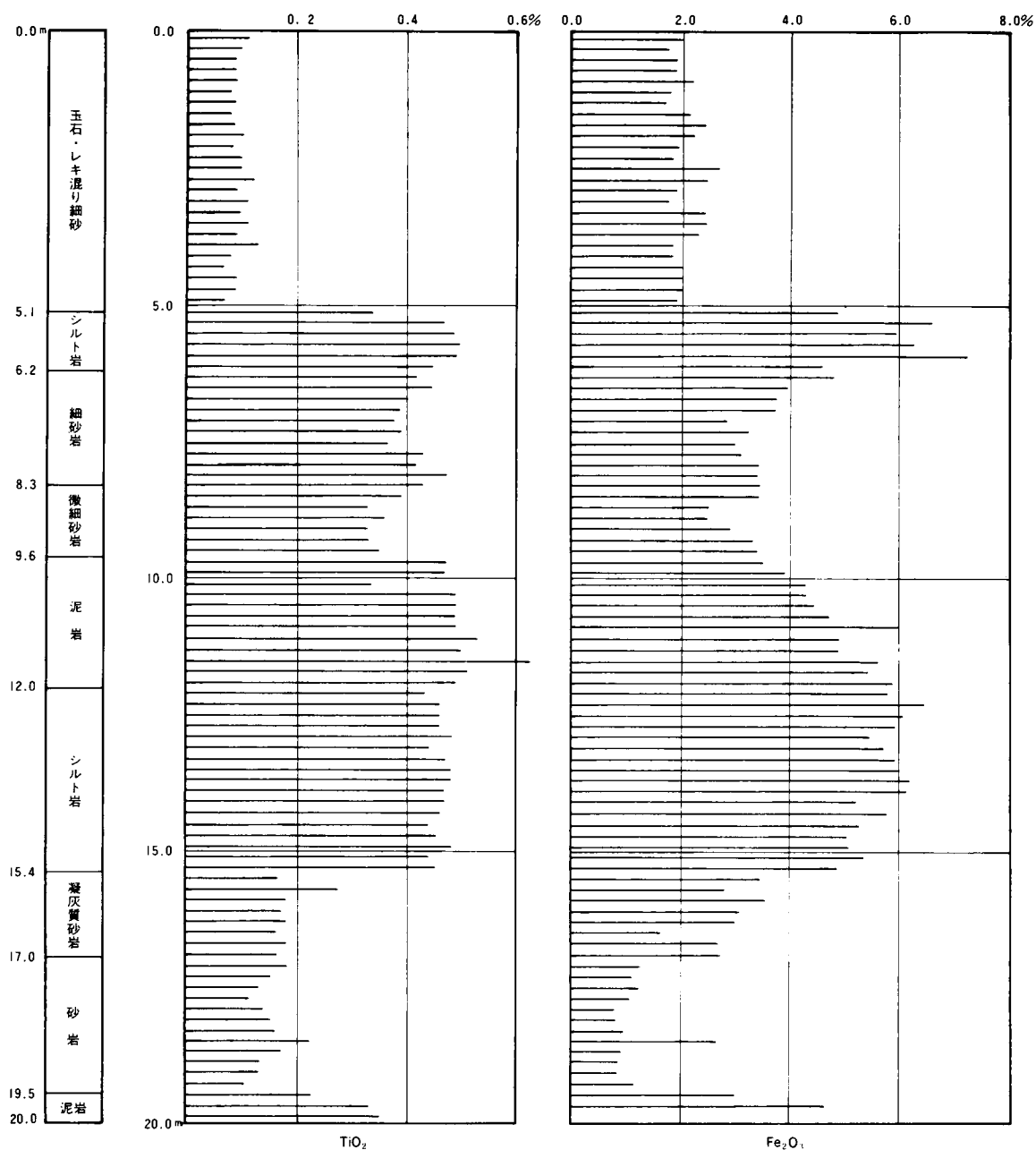


図-3-29 TiO_2 , Fe_2O_3 の定量図 (ボーリングNo.1)

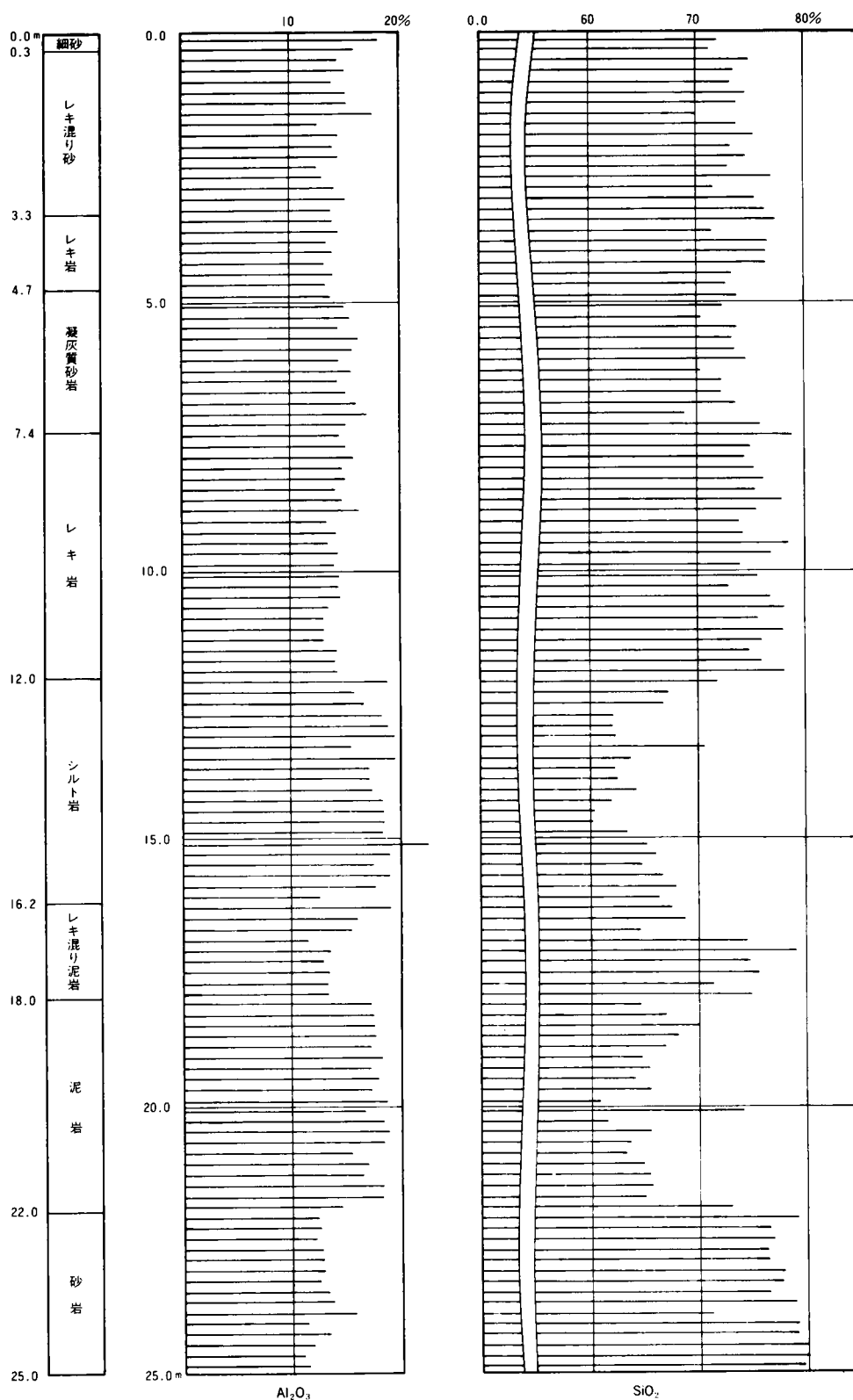


図-3-30 Al_2O_3 SiO_2 の定量図 (ボーリングNo.2)

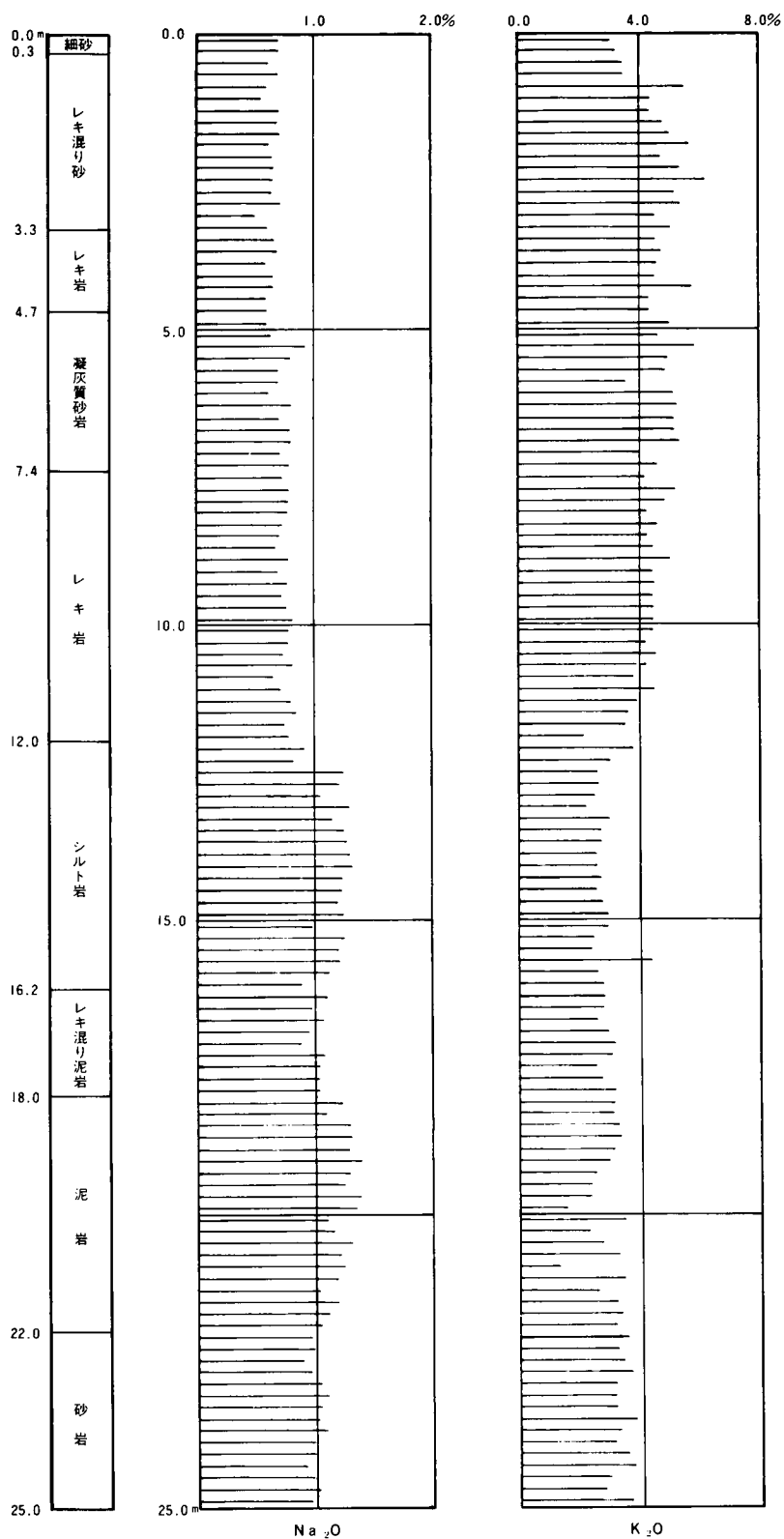


図-3-31 Na_2O , K_2O の定量図 (ボーリングNo.2)

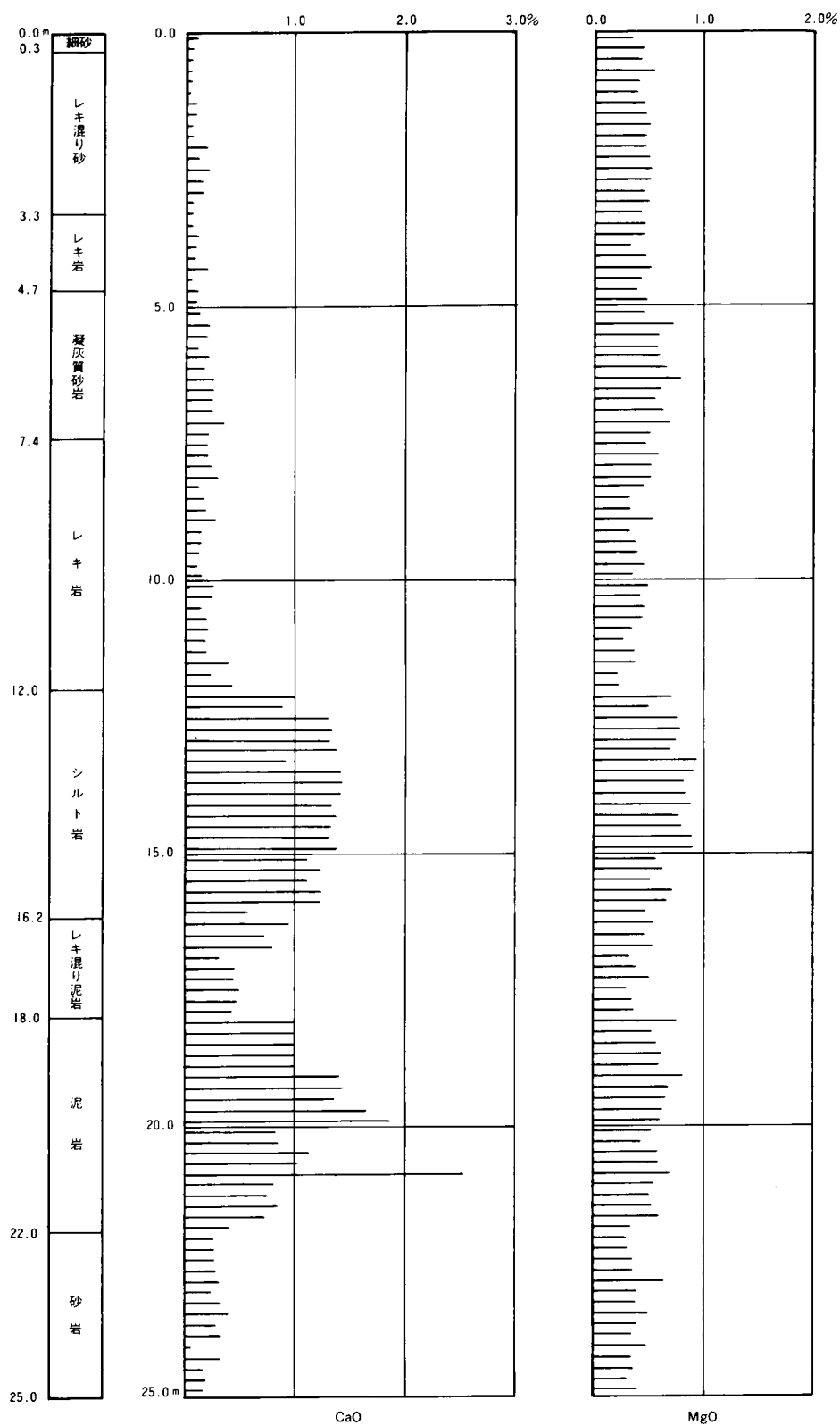


図-3-32 CaO, MgO 定量図 (ボーリングNo.2)

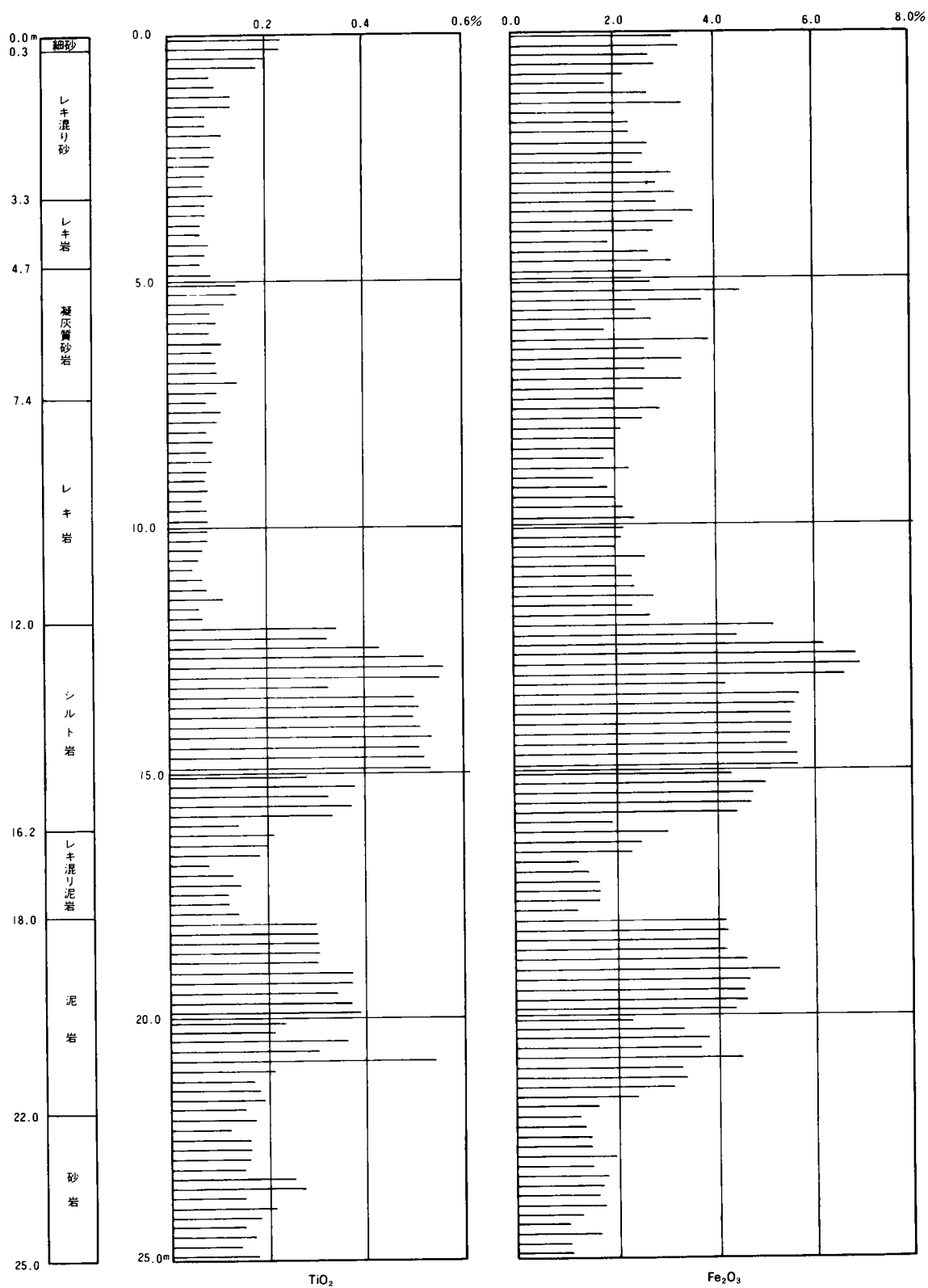


図-3-33 TiO_2 , Fe_2O_3 定量図 (ボーリングNo.2)

3.4 ノルム計算¹¹⁾

3.4.1 原 理

化学組成の重量パーセントより、モル数を計算し、各鉱物示性式によって元素を組み合わせ、構成鉱物の含有量を求める計算をノルム計算という。

3.2.1の定性分析より斜面構成土は、石英、長石、モンモリロナイトの3鉱物が主成分と判明しているため、これに従ってノルム計算を行なう。

計算方法

- 1) 化学組成重量パーセントをそれぞれ分子量で割り、モル数を出す。
- 2) モル数0.002以下のものは無視
- 3) CaO, Al₂O₃, SiO₂を灰長石に配分
- 4) Na₂Oと残りのAl₂O₃, SiO₂をソウ長石に配分
- 5) K₂Oと残りのAl₂O₃, SiO₂をカリ長石に配分
- 6) 残りのAl₂O₃, SiO₂をモンモリロナイトに配分
- 7) 残ったSiO₂を石英とする。

各示性式は次のとおりである。

灰 長 石 : CaO · Al₂O₃ · 2 SiO₂

ソ ウ 長 石 : Na₂O · Al₂O₃ · 6 SiO₂

カ リ 長 石 : K₂O · Al₂O₃ · 6 SiO₂

モンモリロナイト : X · Al_{2.33}Si_{3.67}O₁₀(OH)₂

Xは置換性陽イオン

石 英 : SiO₂

モンモリロナイトについては花崗岩地帯において粘土鉱物の生産量を推定するときを用いる式¹²⁾を利用したが、その複雑さから置換性陽イオンを除いて重量を計算した。

- 8) それぞれの鉱物のモル数と分子量をかけ重量を求める。
- 9) 灰長石+ソウ長石+カリ長石=長石とする。
- 10) 石英:長石:モンモリロナイトの重量比を求める。

3.4.2 計算結果と考察

ノルム計算結果を表-3.29~3.34, 図-3.34~3.35に示す。

(1) 全体的傾向

長石が30%前後で一定した値をとり、シルト岩、泥岩層の風化で減少がみられないのは、粘土鉱物に存在するCaO, Na₂Oをすべて長石に配分したためである。また、モンモリロナイト部分には他の粘土鉱物(イライト、カオリナイトなど)が一括して含まれている。以上のようなノルム計算結果は、3鉱物の定量的評価に問題を残すものの、その変化図における石英、モンモリロナイトは各層の風化傾向を定性的に表現しており、シルト岩、泥岩層でのモンモリロナイトの増加を示している。

(2) すべり面付近

i) ボーリングNo.1

シルト岩から凝灰質砂岩層にかけて石英の増加、長石、モンモリロナイトの減少がみられるが、X線回折定性分析から凝灰質砂岩層に石英はほとんど存在していないため、石英に配分したSiO₂はほとんどアロフェンなどの非晶質(1~2SiO₂ · Al₂O₃ · nH₂O)に由来

していると推定できる。

ii) ボーリングNo.2

シルト岩層からレキ混り泥岩層にかけて石英の増加，モンモリロナイトの減少がみられる。この事より，地層の境界面付近に含有成分の異常がみられると，そこにすべり面の形成されている可能性が高いといえる。

このようなノルム計算結果と，さきに述べたX線回析による定量結果とは必ずしも同一結果を与えるものではないが，両者を併用して比較検討することが構成鉱物の合理的判定につながる。

表-3-29 ノルム計算値（重量パーセント）（ボーリングNo.1）

	Q	F	M		Q	F	M		Q	F	M
0.0 m	29.1	21.3	49.6	3.0 m	36.0	29.4	34.6	6.0 m	36.5	35.2	28.3
0.2	35.3	25.9	38.8	3.2	39.9	34.0	26.1	6.2	30.0	30.0	40.0
0.4	42.1	25.4	32.4	3.4	40.2	31.1	28.7	6.4	35.2	38.3	26.5
0.6	36.1	38.3	25.6	3.6	35.0	32.6	32.4	6.6	32.7	37.5	29.8
0.8	36.3	26.1	37.6	3.8	40.7	32.4	26.9	6.8	31.0	37.4	31.6
1.0	37.0	29.4	33.6	4.0	39.7	37.6	28.7	7.0	27.7	31.3	41.0
1.2	35.1	31.0	33.9	4.2	39.9	38.9	21.2	7.2	35.6	34.2	30.2
1.4	26.2	32.5	41.3	4.4	38.2	30.7	31.1	7.4	39.7	30.4	29.9
1.6	40.6	36.1	23.3	4.6	33.6	25.4	41.0	7.6	34.0	37.2	28.8
1.8	36.2	37.0	26.8	4.8	34.2	34.3	31.5	7.8	34.2	35.5	30.3
2.0	37.4	33.5	29.1	5.0	34.9	31.7	33.4	8.0	37.8	33.5	28.7
2.2	36.6	38.2	25.3	5.2	29.1	44.1	26.8	8.2	36.2	31.4	33.4
2.4	38.1	46.0	15.9	5.4	36.3	37.2	26.5	8.4	39.5	30.9	29.6
2.6	40.5	36.6	22.9	5.6	31.3	33.2	35.5	8.6	32.2	25.2	42.6
2.8	34.4	39.0	26.6	5.8	35.1	26.6	38.3	8.8	26.3	27.7	46.0

Q = Quartz F = Felspars M = Montmorillonite 0.0 m = 0.0 m ~ 0.2 m

表-3-30 ノルム計算値（重量パーセント）（ボーリングNo.1）

	Q	F	M		Q	F	M		Q	F	M
9.0 m	46.8	38.2	15.0	12.0 m	35.8	36.4	27.8	15.0 m	22.4	40.5	37.1
9.2	45.1	38.3	16.6	12.2	32.7	43.3	24.0	15.2	20.8	43.1	36.1
9.4	44.3	37.8	17.9	12.4	31.6	41.8	26.6	15.4	26.0	28.3	45.7
9.6	37.4	32.6	30.0	12.6	31.0	37.8	31.2	15.6	44.0	30.4	25.6
9.8	38.5	32.8	28.7	12.8	32.4	42.9	24.7	15.8	46.2	27.2	26.6
10.0	35.3	31.4	33.3	13.0	34.9	42.8	22.3	16.0	42.5	27.7	29.8
10.2	32.0	33.6	34.4	13.2	35.0	41.5	22.7	16.2	43.5	25.4	31.1
10.4	34.2	34.5	31.3	13.4	32.0	40.7	27.3	16.4	43.6	22.4	34.0
10.6	32.3	32.8	34.9	13.6	33.1	41.8	25.1	16.6	41.1	24.9	34.0
10.8	36.4	31.4	32.2	13.8	34.8	39.7	25.5	16.8	43.6	25.6	30.8
11.0	25.5	39.8	34.7	14.0	29.7	38.2	32.1	17.0	51.0	31.0	18.0
11.2	33.3	38.4	28.3	14.2	24.4	40.0	35.6	17.2	64.2	31.1	4.7
11.4	32.2	39.4	28.4	14.4	24.8	39.9	35.2	17.4	56.1	30.0	13.9
11.6	30.7	42.9	26.4	14.6	28.6	38.9	32.5	17.6	57.1	28.9	14.0
11.8	32.4	40.4	27.2	14.8	19.0	42.0	39.0	17.8	55.8	29.3	14.9

表-3-31 ノルム計算値（重量パーセント）
（ボーリングNo.1）

	Q	F	M
18.0 m	55.8	30.2	14.0
18.2	54.5	29.7	15.8
18.4	42.6	33.1	24.3
18.6	51.5	29.8	18.7
18.8	48.6	31.3	20.1
19.0	52.5	31.7	16.8
19.2	48.7	30.8	20.5
19.4	39.1	34.7	26.2
19.6	28.3	38.8	32.9
19.8	23.8	42.6	33.6

表-3-32 ノルム計算値（重量パーセント）（ボーリングNo.2）

	Q	F	M
0.0 m	45.6	40.5	13.9
0.2	40.9	37.9	21.2
0.4	39.3	39.3	21.4
0.6	44.7	33.1	22.2
0.8	40.1	33.7	26.2
1.0	50.0	33.8	16.2
1.2	47.8	32.0	20.2
1.4	39.4	41.7	18.9
1.6	37.6	49.9	12.5
1.8	41.5	34.7	23.8
2.0	43.4	33.5	23.1
2.2	41.5	40.4	18.1
2.4	32.2	50.4	17.4
2.6	39.4	43.8	16.8
2.8	45.7	32.2	22.1

	Q	F	M
3.0 m	36.9	49.3	13.8
3.2	45.5	34.7	19.8
3.4	20.5	41.0	38.5
3.6	36.9	27.2	34.9
3.8	35.3	29.1	35.6
4.0	43.2	35.5	21.3
4.2	46.4	34.5	19.1
4.4	50.0	35.2	14.8
4.6	42.5	38.3	19.2
4.8	44.6	33.4	22.0
5.0	36.2	35.0	30.4
5.2	36.6	33.0	30.4
5.4	31.7	34.6	33.7
5.6	35.6	34.8	29.6
5.8	30.9	39.8	29.3

	Q	F	M
6.0 m	36.3	32.9	30.8
6.2	37.8	34.8	27.4
6.4	35.6	34.6	29.8
6.6	38.1	33.8	28.1
6.8	36.3	33.6	30.1
7.0	36.2	35.5	28.3
7.2	35.4	35.4	29.2
7.4	35.6	32.1	32.3
7.6	37.1	36.7	26.2
7.8	36.9	33.8	29.3
8.0	39.4	32.0	28.6
8.2	41.5	36.7	21.8
8.4	40.1	37.0	22.9
8.6	45.7	38.7	15.6
8.8	42.1	38.3	19.6

Q = Quartz F = Felspars M = Montmorillonite 0.0 m = 0.0 m ~ 0.2 m

表-3-33 ノルム計算値（重量パーセント）（ボーリングNo.2）

	Q	F	M
9.0 m	39.4	3.0	27.6
9.2	37.5	33.8	28.7
9.4	41.7	31.6	26.7
9.6	40.7	28.5	30.8
9.8	44.8	29.6	25.6
10.0	37.3	33.6	29.1
10.2	37.7	30.8	31.5
10.4	37.6	32.5	29.9
10.6	41.4	32.2	26.4
10.8	41.6	29.0	29.4
11.0	43.2	32.8	24.0
11.2	42.5	31.7	25.8
11.4	39.5	29.9	30.6
11.6	40.9	27.2	31.9
11.8	46.8	25.7	37.5

	Q	F	M
12.0 m	22.9	34.5	42.6
12.2	32.9	30.0	37.1
12.4	30.7	33.3	36.0
12.6	24.6	33.4	42.0
12.8	23.1	31.6	45.3
13.0	20.4	30.4	49.2
13.2	34.6	31.8	36.7
13.4	20.5	46.2	33.3
13.6	24.8	36.0	39.2
13.8	25.2	34.8	40.0
14.0	26.1	34.8	39.1
14.2	22.2	34.5	43.3
14.4	23.1	34.8	42.1
14.6	20.1	34.8	45.1
14.8	22.2	35.3	42.5

	Q	F	M
15.0 m	14.8	28.5	56.7
15.2	23.6	30.9	45.5
15.4	26.6	31.1	42.3
15.6	22.6	46.1	31.3
15.8	28.4	30.7	40.9
16.0	40.7	29.5	29.8
16.2	24.2	29.6	46.2
16.4	32.4	40.8	26.8
16.6	31.1	30.0	38.9
16.8	47.8	28.3	23.9
17.0	44.7	26.5	28.8
17.2	42.9	29.3	27.8
17.4	43.9	26.3	29.8
17.6	40.9	27.7	31.4
17.8	42.0	30.5	27.5

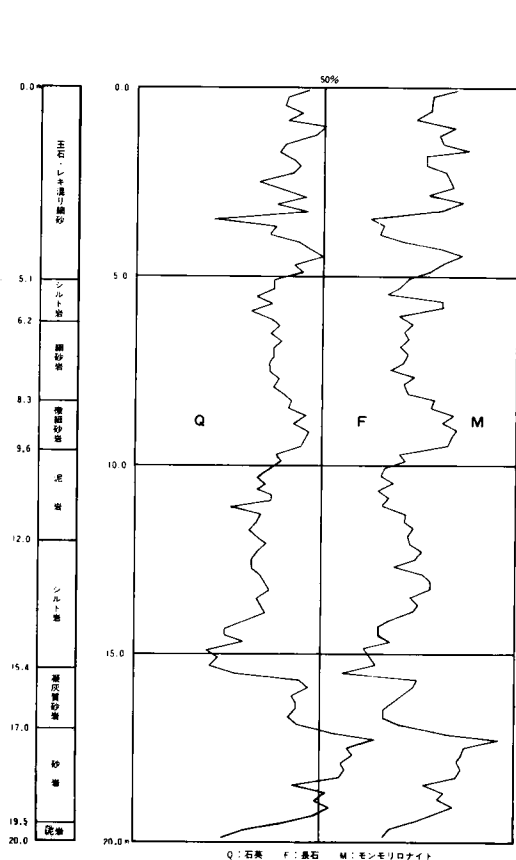
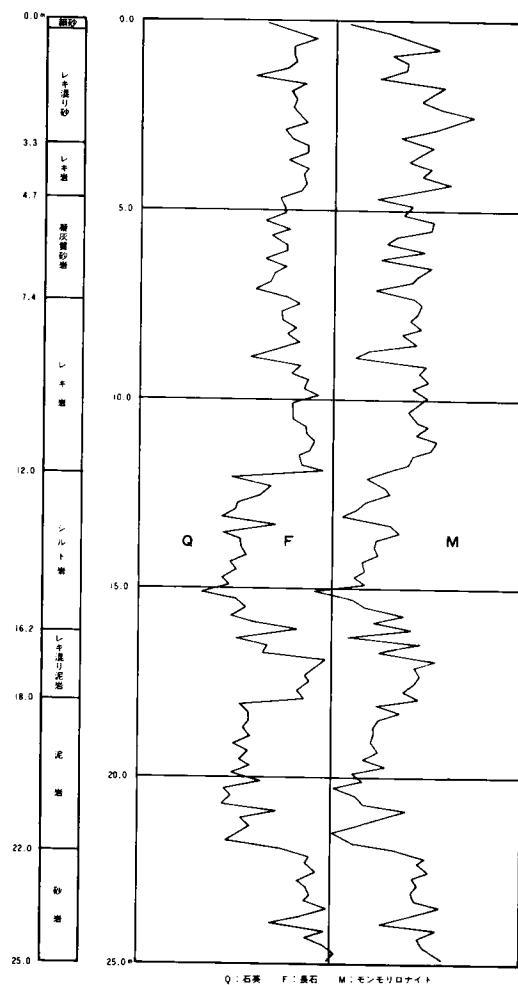
表-3-34 ノルム計算値 (重量パーセント)

(ボーリングNo.2)

	Q	F	M
18.0 m	25.8	34.8	39.4
18.2	27.5	40.3	32.2
18.4	27.8	34.2	38.0
18.6	26.3	34.5	39.2
18.8	27.5	33.4	39.1
19.0	23.2	36.6	40.2
19.2	27.6	33.7	38.7
19.4	25.3	31.8	42.9
19.6	28.5	34.6	36.9
19.8	23.3	31.3	45.4
20.0	31.4	26.6	42.0
20.2	21.5	28.5	50.0
20.4	23.1	32.7	44.2
20.6	21.6	36.0	42.4
20.8	35.4	34.0	30.6

	Q	F	M
21.0 m	25.8	35.8	39.4
21.2	28.5	38.2	43.3
21.4	25.3	24.6	50.1
21.6	22.8	32.4	44.8
21.8	36.7	30.6	33.7
22.0	45.9	30.1	25.0
22.2	43.8	29.1	27.1
22.4	45.4	30.2	24.4
22.6	41.2	30.2	28.6
22.8	43.7	30.7	26.6
23.0	44.1	28.7	27.2
23.2	43.7	29.2	27.1
23.4	49.8	28.9	21.3
23.6	42.3	28.4	29.3
23.8	33.9	28.4	38.7

	Q	F	M
24.0 m	48.0	31.3	21.7
24.2	43.2	30.6	26.2
24.4	48.9	25.5	25.6
24.6	51.1	26.6	22.3
24.8	49.2	30.3	20.5

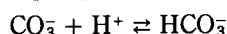
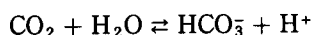
図-3-34 ノルム計算による斜面構成土主鉱物の定量図
(ボーリングNo.1)図-3-35 ノルム計算による斜面構成土主鉱物の定量図
(ボーリングNo.2)

3.5 イオン交換特性

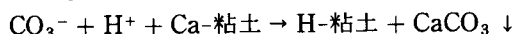
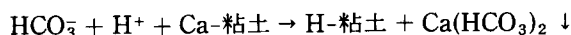
3.5.1 目 的

地すべり地帯には、地すべりの原因となる界面活性度の高い粘土鉱物が多量に含まれていることはすでに述べたが、これらは絶えず雨水、地下水の流動などによってイオン交換作用を受け入れやすい状態におかれている。イオン交換作用としては、^{13),14),15),16),17),18)}地下水中に溶存した塩類による吸着イオンの置換あるいは、 H^+ 、 Al^{+3} などの酸性カチオンへの置換であり、このようにして土は酸性化、弱体化してゆく。

他の作用としては地下水中の遊離炭酸イオンは次のような状態にあり、



この遊離炭酸イオンを含んだ地下水が土粒子間げきを流れると、粘土粒子に吸着しているカチオンの HCO_3^- との反応による重炭酸塩化あるいは CO_3^{2-} との反応による炭酸塩化が進行し、 H^+ はもとのカチオン位置に吸着してH-粘土になる。この反応を示すと次のようになる。



このような反応が進行すると、前章で述べたように、斜面を構成する土が劣化し、地すべりの素因となる。従って、斜面構成土の遊離、吸着カチオンおよび塩基置換容量を定量してやれば、斜面の安定度を判定することも可能である。

3.5.2 試料調整と実験方法

(1)遊離カチオンの定量

ボーリング試料を20cmごとに区切り、各中心から取り出したサンプルを110℃で炉乾燥させ、Spex社製粉碎機(No.8000)で約15分間粉碎したものから2gを取り、これに約300mlのメチルアルコールを加え、約1時間振とう機にかけたのち、遠心分離機によって分離した液量を正確に定量する。これを原子吸光分析装置で、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} の濃度を検量線法を用いて測定する。この原子吸光分析装置は、相対値測定であるため、検量線の濃度以内に収まるよう、溶液を適宜希釈した。結果は各カチオン試料100gに対するミリグラム当量で表わす。

(2)吸着カチオンの定量

(1)で用いた試料に、さらに酢酸アンモニウム1規定溶液を約300ml加え、(1)と同様にして得た溶液を定量し、原子吸光装置で濃度を測定した。

(3)塩基置換容量(C.E.C.)の定量

(1)で得られた粉碎土から2gをとり、塩化カルシウム1規定溶液約300mlを加えて土中のカチオンを Ca^{2+} と置換させる。さらに約300mlのメチルアルコールを加えて余分の Ca^{2+} を洗い流し、再び酢酸アンモニウム1規定溶液約300mlで抽出した液中の Ca^{2+} を原子吸光分析で測定する。なお、いずれも溶液を加えたのち、約1時間振とう機にかけ、その後、遠心分離機によって溶液と試料を分離させる。

3.5.3 実験結果と考察

実験結果を付表-3・1～付表-3・22, 図-3・36～図-3・39に示す。

(1) 全体的傾向

風化のすすんだ泥岩, シルト岩層では, 界面活性の高い粘土鉱物であるモンモリロナイトが多量に存在することにより, C.E.C. は平均50 m.e.q./100 g と高い値を示す。一方, レキ, 砂岩層でも20 m.e.q./100 g 前後あり, この層にもある程度モンモリロナイトが含有されていることがわかる。吸着 Ca^{2+} は他のイオンに比べ表層を除いては大きな値を示しており, 土壌中の優勢な陽イオンであることがわかる。また, 表層では, 雨水, 表面水の影響でかなり溶脱が進んでおり, その他のイオンが, C.E.C. 値の80%以上を占め, H-粘土, Al-粘土化が進行している。

(2) すべり面付近

i) ボーリングNo. 1

すべり面より上層のシルト岩層において, C.E.C. 値は平均50 m.e.q./100 g 前後であるが, 下層の凝灰質砂岩層では, 平均60 m.e.q./100 g に上昇し, 最高値は75 m.e.q./100 g を示すことから, この層に非常に界面活性の高いモンモリロナイトあるいは非晶質が多量に存在すると考えられる。また, 遊離, 吸着 Na^+ が他に比べて激増していることから, Na 型のモンモリロナイトになっている。この事は4章で示すように, 層間の膨潤が起り易く, 工学的な特性の弱体化が進行しているものと推定される。

ii) ボーリングNo. 2

すべり面上層部のシルト層のC.E.C. 値は60 m.e.q./100 g と高いが, 下層のレキ混り泥岩では約30 m.e.q./100 g と落ち, 界面活性の高い粘土鉱物の含有量の減少を示している。

(3) モンモリロナイト含有量の推定

3.2の鉱物分析から明らかなように, 当斜面はカオリナイト, イライトの含有量が非常に少ないことと, これら粘土鉱物のC.E.C. 値が低いことから, ここで測定されたC.E.C. 値

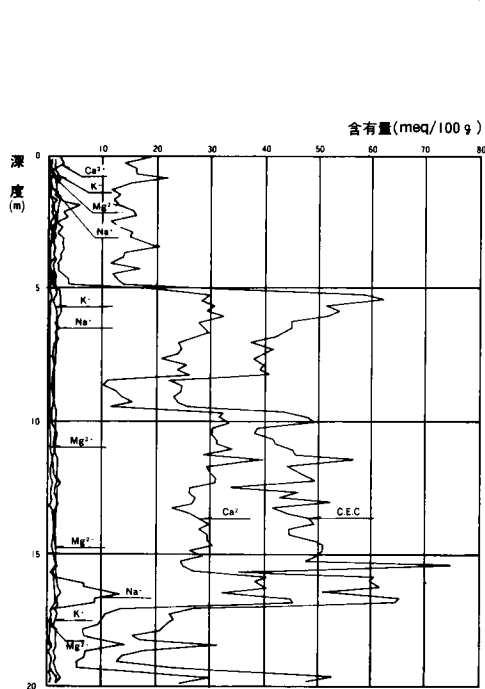


図-3・36 交換性カチオン量 (No.1 ボーリング地点)

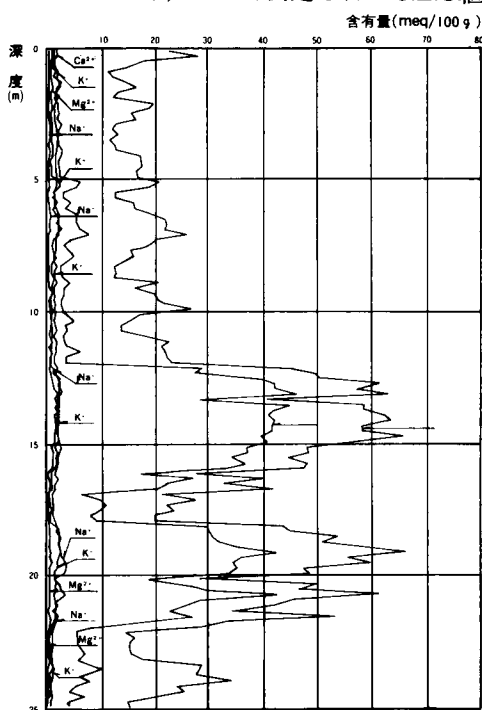


図-3・37 交換性カチオン量 (No.2 ボーリング地点)

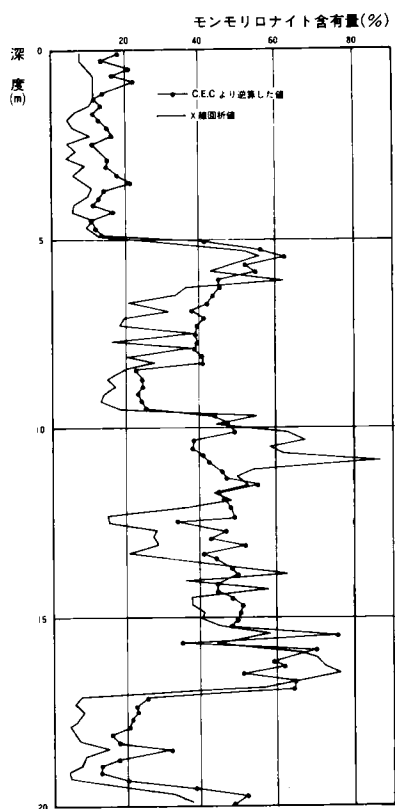


図-3-38 CEC 値から逆算されたモンモリロナイト含有量 (No.1 ボーリング地点)

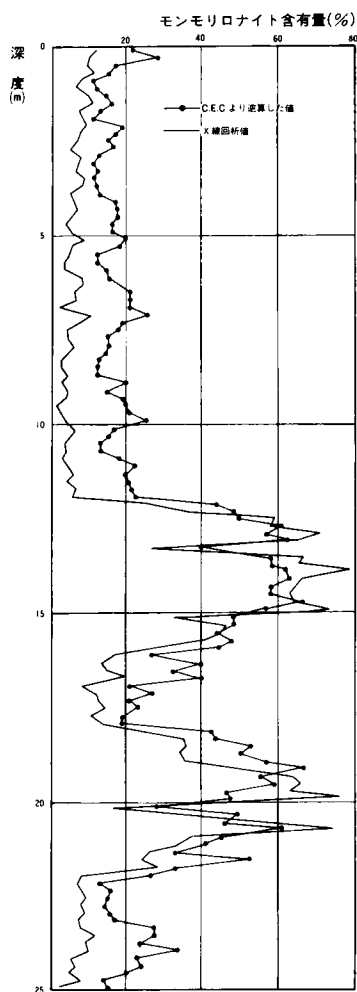


図-3-39 CEC 値から逆算されたモンモリロナイト含有量 (No.2 ボーリング地点)

はすべてモンモリロナイトに起因するものとし、そのC.E.C. 値を100m.e.q./100 g とした場合、各層のC.E.C. 値はモンモリロナイトの含有率と一致することになりその定量分析が可能である。¹⁹⁾ その結果をX線回折によるモンモリロナイトの比較図として、図-3-38、図-3-39に示す。(ただし、ボーリングNo.1のアロフェンが認められる凝灰質砂岩層ではX線回折からの定量値は全体から石英、長石の含有率を差引いたもの、C.E.C. 値からの定量値はアロフェンのC.E.C. 値も100m.e.q./100 g として定量したものであるので、アロフェン+モンモリロナイトの含有量を表わすことになる。)

全体的傾向として、両定量値はかなり一致した曲線を描くが、個々の値はX線回折定量にばらつきが多い。これはX線回折のための試料調整の段階でばらつきが多いこと、さらに、測定誤差、マトリックス効果が加わったものと考えられる。

すべり面付近については、ボーリングNo.1において、C.E.C. による定量値が最高値を示す層と層平均定量値が両者とも最高である層が凝灰質砂岩層であり、この部分の工学的強度の弱体化がすべり面構成に大きな影響を与えていることがうかがえる。また、ボーリングNo.2では、モンモリロナイト量が60%を越えるシルト岩と泥岩層には含まれたレキ混り泥岩層ですべりの生じていることがわかる。

3.6 強熱減量

前節までに述べたように、地すべり粘土としてモンモリロナイト系粘土鉱物を指摘することができ、この存在をあらかじめ決定することができれば、第3紀層地すべり地での地すべり対策が容易になる。ところが、地すべり粘土の把握のためには、物理化学的な測定に非常な時間と技術とを要する。そのため、すべり面の予知としては、簡便な方法でかつ試料としてもわずかの量で可能なパラメーターの設定が要求される。これまで、地すべり斜面構成土の特性の検討から、コンシステンシーでは地すべり粘土の特徴を十分に示しえないこと、そのため比表面積の変化が1つのパラメーターとなり得るという報告がみられる。²⁰⁾ しかしながら、比表面積は必ずしも一般的な手法でないため、ここでは強熱減量法の適用について考察する。

3.6.1 原 理

粘土鉱物を室温より高温に加熱すると、粘土の種類により特有の変化を示す。その変化は、粘土鉱物が種々の形で保有する水の放出によるもの、結晶構造の変化、新相の生成によるものとに分けることができる。それらのうち、最も多いのは粘土がもつ水の脱水に基づくものである。

粘土鉱物のもつ水は、大きく分けると、吸着水、層間水、構造水に分かれる。吸着水は粘土粒子の表面あるいは結晶破面に吸着された水、層間水は粘土結晶の層間に存在する水、構造水は常温ではOHとして存在し、水分子として存在しないが、550℃以上に加熱すると水として放出されるものである。多くの粘土鉱物においては、室温～300℃で吸着水、層間水が放出され、500℃～750℃で構造水が放出される。ここで、110℃までに取り除かれた水をH₂O(−)と称し、それ以上の温度で取り除かれる水をH₂O(+)と称する。しかし、110℃以上で失われるものは、水分だけでなく、有機物や炭酸塩類の分解によるCO₂の放出、アンモニア化合物の分解による減量などがある。また反対に粘土鉱物の内部に含有される金属が酸化され、酸素の重量だけ増える場合もある。そういったことから、強熱減量のみから、構造水、層間水の脱水による粘土鉱物の同定へと結びつけることは難しい。しかしX線回折、DTAなどによる分析として用いられる時には有効であるが、何よりも分析操作が簡単であることと、大まかな土性の判定には適当な手段である。

3.6.2 実験方法

- i) 粉末試料を約0.5 g 取る。
- ii) これを恒量化した20ml磁性ルツボに入れ約4時間以上、電気炉(110℃)の中で空気浴中に保つ。
- iii) その後取り出して、デシケーター内で室温にまで冷却し、秤量する。
- iv) 再び同上の空気浴中に0.5～1時間保ち、冷却後秤量する。
- v) 各測定値からルツボの重量をさし引いた値の平均値を恒量としW₁とする。すなわち、

$$W_1 = \frac{(w'_1 - w_0) + (w''_1 - w_0)}{2}$$

w_0 = ルツボの重量

w'_1 = 1度目炉乾燥後の重量

w''_1 = 2度目炉乾燥後の重量

- vi) 次にチクリューガスバーナーによる直接加熱（チクリューガスバーナーで磁性ルツボを熱すると800～820℃になる）し、約1時間保つ。
- vii) デシケーター内で冷却後秤量する。
- viii) その各測定値から、ルツボの重量をさし引いた値の平均値を恒量と考え、 W_2 とする。
すなわち、

$$W_2 = \frac{(w'_2 - w_0) + (w''_2 - w_0)}{2}$$

w'_2 = 1度目の加熱後の重量

w''_2 = 2度目の加熱後の重量

- ix) 110℃以上での重量減量を試料内の $H_2O(+)$ の減量によるものとする。
- x) この減量を $H_2O(-)$ を取り除いた状態の重量で除し、重量百分率で表わしたものを試料内の $H_2O(+)$ 含有率とする。

$$H_2O(+) \text{ 含有率 } (\%) = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100$$

3.6.3 結果および考察

X線回折分析から求めたモンモリロナイト含有量とともに示すと図-3・40、3・41のようになる。強熱減量の変化状況はモンモリロナイト含有量の変化と極めて良い一致が得られている。また、ひづみ計で得られたすべり面位置を記しているが、強熱減量がすべり面推定の一つの有力なパラメーターとなり得ることを表している。図中には仮想すべり面として、破線のような部位に危険部位が見られる。

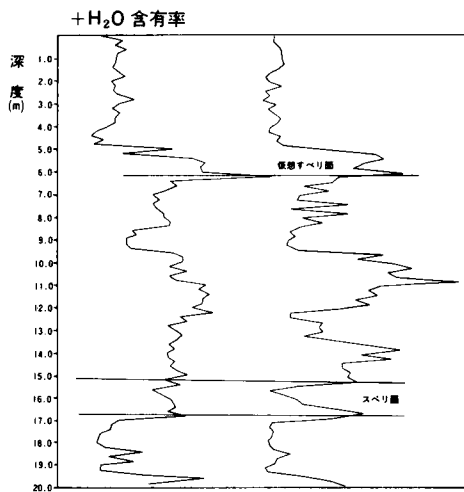


図-3・40．X線回折によるモンモリロナイト
定量図と強熱減量（ボーリングNo.1）

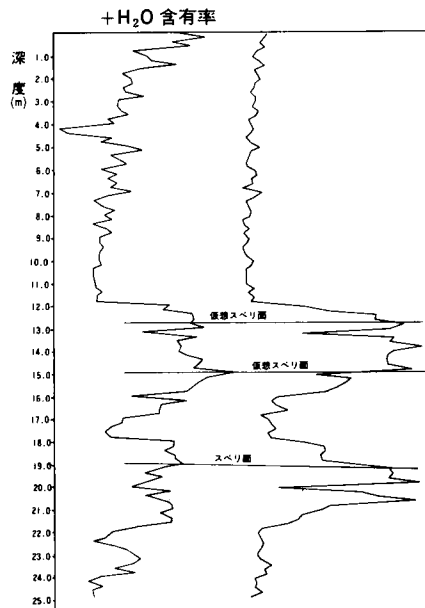


図-3・41 X線回折によるモンモリロナイト
定量図と強熱減量（ボーリングNo.2）

さきに示したように、強熱減量法は極めて単純な手法で求める値であることから、地すべりの予知のための有力なパラメーターとして使うことができる。

3.7 結 論

地すべり地における斜面構成土の物理化学的特性を解明することによって、すべり面の予知に利用できることを明らかにしてきたが、得られた成果をまとめると次のとおりである。

(1)地すべり斜面構成土の物理化学的特性として、構成鉱物の検討の結果、界面活性の高いモンモリロナイトあるいは非晶質のアロフェンなどがすべり面付近に卓越している。

(2)これらのイオン交換特性では、高いC.E.C.値を示すこと、このC.E.C.値をモンモリロナイトあるいはアロフェンに起因するものとして逆算した活性粘土鉱物量は、X線回折結果とよく一致する。また、モンモリロナイトはNa型のものであり、最も膨潤度の高いものであった。

(3)当該斜面構成土の強熱減量が、モンモリロナイト含有量変化と高い相関をもつことから、すべり面予知のためのパラメーターとして強熱減量法の利用も可能であった。

(4)すべり面の予知法としては、X線回折、吸着カチオン特性、C.E.C.値、蛍光X線解析、構成鉱物解析および強熱減量法の全てが利用できる。従って、どの方法を用いるかは、安定工法とのからみで決定すべきであろう。

〈 参 考 文 献 〉

- 1) 松尾新一郎, 富田武満, 「地すべり斜面構成土の化学組成について」第9回土質工学研究発表会講演概要集, p.p.741 ~ 744, 1974.
- 2) 松尾新一郎, 富田武満, 「地すべり斜面構成土の化学組成について」第29回土木学会年次学術講演会概要集, pp. 398 ~ 399, 1974.
- 3) 松尾新一郎, 富田武満, 「地すべり斜面構成土の化学組成について」, 第10回土質工学研究発表会講演概要集, p.p. 59 ~ 62, 1975.
- 4) 松尾新一郎, 嘉門雅史, 富田武満, 「地すべりの物理化学的方法による予知と対策方法について」土質工学会誌「土と基礎」, Vol. 28, No.265, p.p.45~52, 1980.
- 5) 石田陽博, 西浦秀一, 「第三紀層神戸層群における農地地すべりに関する研究」, 地すべり, Vol. 12, No.3, p.p. 17 ~ 23, 1975.
- 6) 理学電機社編, 「X線分析の手引」p.41, 理学電機社, 1971.
- 7) 平凡社編, 「地学辞典」, p.1185, 平凡社, 1971.
- 8) L. Abrander & H.L. Klug; "Basic Aspection of X-ray Absorbtion", Anal. Chem. Vol. 20, 1948
- 9) 浅田栄一他, 「X線分析」p.76, 共立出版, 1973.
- 10) Keller, W.D.; "Process of Alterration of Clay minerals", Soil Clay mineralogy Univ, of North Carolina, p.p.3 ~ 76. 1964.
- 11) 既出 7), p.p.1242 ~ 1243
- 12) 既出 7), p.p.1242 ~ 1243
- 13) Matsuo, S., "Effeet of Ion Exchange in Stability of Earth Slope," Proc. Conf. the 4th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. p.p.330~331, 1957.
- 14) 松尾新一郎, 富田武満, 「地すべり粘土の物理化学的性質とその対策について」第5回土質工学研究発表会講演集, p.p.413 ~ 416, 1970.
- 15) 松尾新一郎, 富田武満, 「斜面安定に及ぼすイオン交換の影響」, 土木学会第25回年次学術講演会概要集, pp. 441 ~ 442, 1970.
- 16) 松尾新一郎, 富田武満, 「斜面安定に及ぼすイオン交換の影響」, 日本材料学会誌「材料」, Vol. 19, No.205, p.p. 53 ~ 58, 1970.
- 17) 松尾新一郎, 富田武満, 「斜面安定に及ぼすイオン交換の影響」, 第7回土質工学研究研究発表会講演集, p.p.515 ~ 518, 1972.
- 18) 松尾新一郎, 富田武満: 斜面崩壊の予知と対策—物理化学的予知— 第11回道路会議特定課題論文集, pp.121~123, 1973.
- 19) J.K. Mitchell, "Fundamentals of Soil Behavior" John Wiley & Sons Inc. p.97, 1976.
- 20) 青山, 小川, 斉藤, 小沢, 「地すべり地の土の比表面積と液性限界及び自然含水比の相関性に関する一考察」, 第12回土質工学発表会講演集, p.p. 117 ~ 120, 1977.

第4章 地すべり粘土の物理化学的安定処理法

4.1 カリウム固定法

4.1.1 固定反応

土におけるカチオンの固定とは、置換性あるいは水溶性のカチオンが中性の塩溶液で抽出されたとしても、置換・抽出されない形になることをいう。この反応に関係するカチオンとしては、一般にカリウムとアンモニウムイオンが挙げられる。とくにカリウムイオンについては、土壌の三大肥料として施肥されたカリ肥料の有効利用という形で土壌学の分野で古くから研究されてきた。カリイオンを固定する鉱物は膨張型の2:1鉱物にかぎられている。その中でもモンモリロナイトとバーミキュライトが主たるものである。

モンモリロナイトのカリ-固定を鉱物学的にみると、モンモリロナイトのイライトへの変化に要約できる。図-4・1¹⁾にモンモリロナイトとイライトの構造を示しているが、その相違は、前者の場合、2:1層間に数分子の水が、後者の場合、カリイオンが存在する。イライトは水の侵入による膨潤はほとんど起らないが、モンモリロナイトは水を吸収することによって、格子が膨張する性質を有していることと、粒径が非常に小さいことから、表面活性が大であり、工学的材料として極めて不利な特性がある。それ故、モンモリロナイトを含む土はしばしば土質安定上、困難な問題をひき起している。筆者は、図-4・1に示したように、イライトとモンモリロナイトの構造の類似性をもとにして、モンモリロナイトのカリ-固定（以後は、K-固定と示す）の特性を、軟弱地盤の改良、地すべり粘土の改良など、土質安定の立場から利用するものである。

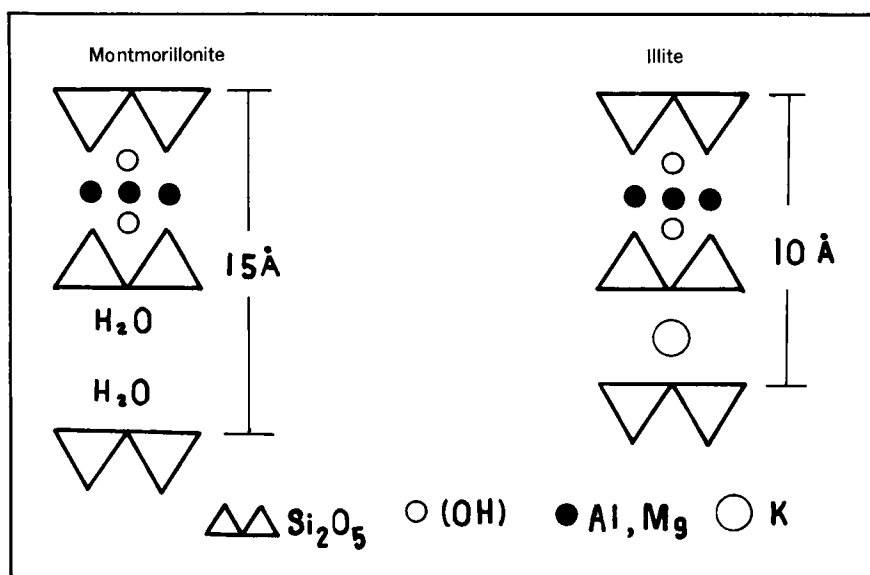


図-4・1 モンモリロナイトとイライトの粘土構造

4.1.2 K-固定に関する過去の研究

この研究は前述したように、K 肥料の有効利用という観点から、土壌学の分野で活発に行われてきた²⁾。この分野の最も先駆的な研究は Volk^{3),4)} のものである。彼は次の事実を

明らかにした。(1)この反応においては、土の乾燥が非常に重要である。(2)粘土分の量も重要だが、粘土の特性がさらに重要である。なぜなら、大量の粘土分が存在していたとしても、カオリナイト系あるいはラテライト系の土はK-固定を示さないからである。(3)土を塩酸で処理すると、固定能力は減少するが、炭酸ナトリウムあるいは消石灰で処理すると、その能力は増大する。(4)加えられたKの量が増大すればするほど、乾燥による固定量は増大するが、固定パーセンテージは減少する。

Chaminade⁵⁾は固定を土の交換能力と関係づけた。すなわち、最大K-固定は土の交換能力の4%以上がKイオンによって占められると起る。

TruogとJones⁶⁾およびKolodny⁷⁾はそれぞれ、K-飽和粘土が湿潤と乾燥を受けたとき、あるいはKClがベントナイト試料に加えられたとき、固定K量とベントナイト試料の交換能力の減少とは関係が存在することをみつけた。表-4・1はその関係を示している。

表-4・1 K-固定量と交換能力の減少

土材料と処理		固定されたK ₂ O (m.e.q./100g)	K-固定後の交換 能力の減少(m.e.q./100g)
ベントナイト			
湿潤と80℃での乾燥を20回行ったもの		33.9	33.0
75時間110℃で乾燥したもの		27.0	28.0
48時間145℃で乾燥したもの		31.5	34.0
土 壤	層		
Miami シルト質ローム	A	1.5	1.9
	B	4.7	4.8
Carrington シルト質ローム	A	2.7	2.7
	B	3.4	3.2
Richfield 粘 土	A	4.0	3.8
	B	5.0	5.1

ある特別なカチオンだけが固定反応に関与するという特殊性解明の手がかりはPageとBaver⁸⁾の研究によって明らかになった。彼らはWyomingベントナイトとMiamiのシルト質ロームから得られたコロイドでカチオンの固定を研究し、カチオン固定と非水和イオン径を関係づけた(図-4・2)。図より明らかなように、K⁺だけでなくNH₄⁺、R_b⁺、C_s⁺およびBa⁺⁺も固定される。彼らは固定の機構を「格子一孔」理論として示した。その概要は次のようである。

(1) 2:1型膨潤格子の層間の露出面は一連の六角形に配列した酸素イオンからなっており、その六角形状の孔は直径2.8Åある。

(2) 粘土は脱水されるにつれて、層間が収縮し、イオンは配向水分子殻を失い、非水和イオン径に近くなる。これらの直径はそれぞれLi=1.20Å, Na=1.90Å, K=2.66Å, NH₄=2.96Å, R_b=2.96Å, C_s=3.38Å, M_g=1.30Å, Ca=1.98Å, Ba=2.70Åである。

(3) その直径が格子「孔」に容易におさまるイオンは固く保持されることになる。これは層間のロック作用と同時に、電気的な結合力の増大による。「孔」に入ることでない大きなカチオンは層内よりもむしろ層間にゆるく保持されたままであり、再水和を受けやすい。「孔」に完全に入ってしまう小さな径のカチオンは、上下両層に接触できず、2層

間の結合は不十分になる。

以上のように、K-固定に関する研究は土壌学の分野で活発に行なわれてきたが、その根本的な目的はモンモリロナイト系の粘土に固定されたKを有効に利用するためのものであり、工学的な目的とは全く逆の立場になる。

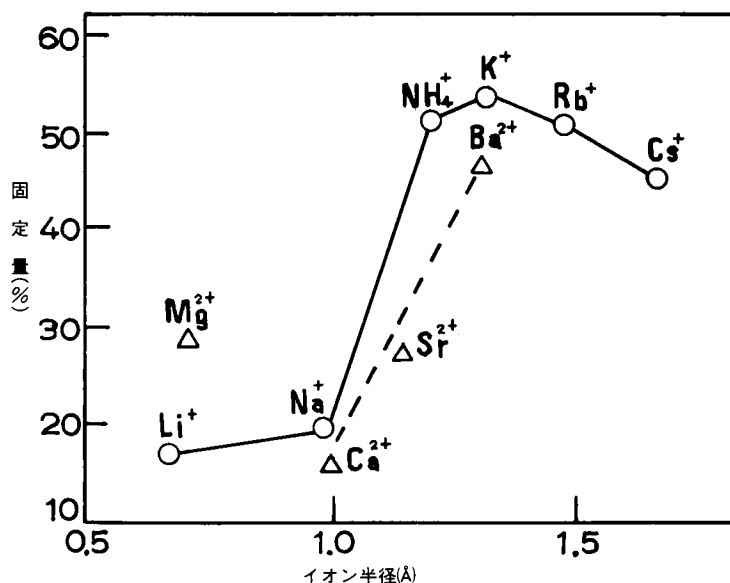


図-4.2 非水和イオン径と固定量

4.1.3 K-固定量に及ぼす各種の影響

(1) 含水状態

Kの固定には含水状態が鋭敏に作用する。最初にK-固定の研究を行なった Volk^{2),3)}は、時日の経過と共に置換性Kの多くは非置換性あるいは固定状態に変るが、これは乾燥状態にしなければほとんど起らず、乾湿を繰り返すとこの作用が促進されると報告している。しかし、Stanford⁹⁾の実験では、湿潤状態であっても、イライイトはKを固定するが、モンモリロナイトではほとんど固定しない。Deturk, WoodおよびBray¹⁰⁾らの実験では、湿潤状態で貯蔵しても固定が起り、6ヶ月～1年の間に見かけの平衡に達する。さらに、Martin, OverstreetおよびHoagland等の研究でも、湿潤状態の場合には、固定を起すにはかなりの時日を必要とするがK⁺のリッチな条件下では長期にわたって固定反応が続行すると報告している。以上の事より、早期にK-固定を必要とする場合には乾燥が不可欠であるが、長期にわたってもいい場合は、湿潤状態でも固定が起る。

(2) 水素イオン濃度

Kが強固な結合のカリーアルミナ硅酸塩となって固定される際に、水素イオンは離脱する。したがってK-固定と水素イオン濃度とは、ある程度の関係が存すると推測されるが、以下に筆者の行なった実験によって明らかにする。¹¹⁾

(a) 試料の作成と実験方法

試料粘土はすべて市販のベントナイトを用いた。粘土のK処理には0.2N塩化カリウム(KCl)溶液を用い、添加量および水素イオン濃度を変えて処理した。KCl添加量は、1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 150ccに、pHはHCl, NaOHで調整を行ない、pH=1.5, 4,

5.5 (未調整), 8, 11.5とした。次に, ペントナイトを正確に 5 g 秤量し, 上記の0.2N KClを加え, 気乾をした。実験は以上のようにして準備をした40個の気乾試料の遊離 K イオン量, 吸着 K イオン量および固定 K イオン量の定量を行なった。

ここで, 遊離 K イオン量とは, 間引き水中に遊離している K イオン量を, 吸着 K イオン量とは試料粘土に吸着しており, 他のカチオンを含む塩類で抽出すると交換される K イオン量を, また, 固定 K イオン量は残った K イオン量を示している。それぞれの定量方法は次のようである。

K 添加気乾試料 5 g を蒸留水でよく洗浄した三角ろ斗に入れ, これにアルコールおよび蒸留水の混合液でろ液が約300ccになるまで抽出した液中の K イオン量が遊離 K イオン量, さらに酢酸アンモニウム ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$) 1 N 溶液でろ液が約300ccになるまで抽出した液中の K イオン量が吸着 K イオン量になる。固定 K イオン量は, 添加した K イオン量から遊離と吸着 K イオン量を差し引いたものである。なお, それぞれの K イオン濃度は, 島津式 MAF 型原子吸光分光光度計を用いて測定した。

(b) 実験結果と考察

実験結果は図-4・3, 4・4に示すようである。K 添加量の増大に伴ない, K 吸着量と K 固定量の絶対量が増えることを示している。しかしながら, K 添加量がある値を越えると, 吸着 K イオン量および固定 K イオン量増加の割合が漸減する。K 添加量を増大させていくと, 曲線上のある点で吸着量および固定量の増大の割合において最大値を有する。この最大値を示す曲線上のある点の K 添加量が最も効率の良い添加量, いわゆる最適 K 添加量と言える。

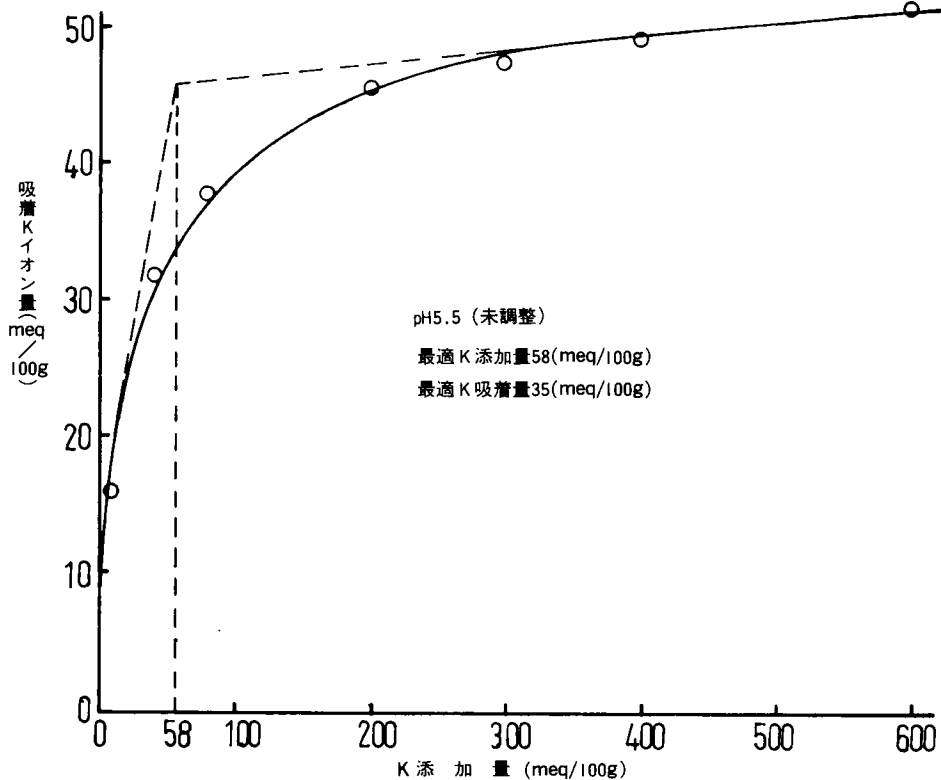


図-4・3 K 添加量と吸着 K イオン量

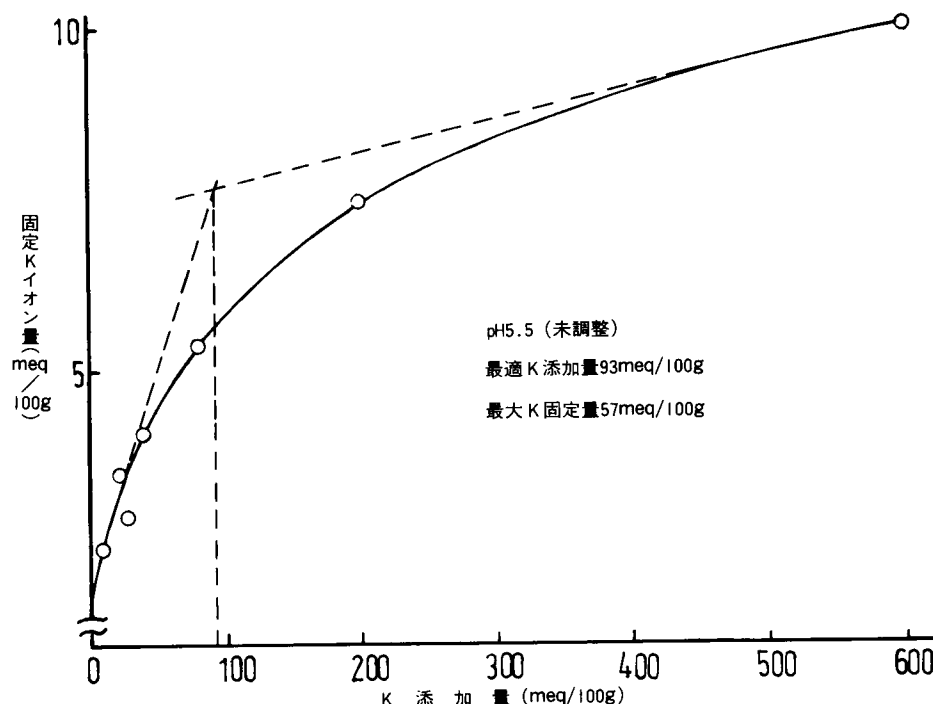


図-4.4 K添加量と固定Kイオン量

理論上、粘土の有する塩基置換容量を境界にして、それを越えるような添加量では、添加量に対する固定量の比率は減少する。一方、置換容量に満たない添加量では、固定量の比率は増大すると考えられる。すなわち、置換容量に等しい添加量で、最も効率の良い固定が起る。pHの変化にともなう最適 K 添加量を求めたのが表-4.2である。最適 K 添加量は吸着量と固定量によって異なり、吸着の場合はやや少なく、固定量に対しては若干増大している。しかし、ほぼ使用したモンモリロナイトの塩基置換容量に等しい K の添加量が最適の値になる。

表4.2 pHと最大K吸着量・最大K固定量と最適K添加量 (meq/100g)

pH	最大K吸着量	最適K添加量	最大K固定量	最適K添加量
11.5	42	69	6.7	89
8	45	86	6.2	88
5.5	35	58	5.7	93
4	41	71	5.0	75
1.5	16	34	3.6	67

pHによる影響は図-4.5より、pH=11.5, 8, 5.5, 4, 1.5の順に K 固定量が増大している。すなわち、アルカリ側で K 処理すれば試料の固定能力が増大することになる。酸性側で処理した場合、 H^+ 量が大になり、交換複合体への H^+ と K^+ の平衡関係が成り立ち、それぞれの濃度に応じた侵入におちつき、吸着量、固定量ともに減ずるものと考えられる。また、アルカリ側での NaOH

の影響は、 Na^+ が水和するとイオン径が非常に大きくなり、層間を拡げる作用が大となって、 K^+ の交換複合体への侵入が容易になり、 K^+ の吸着量と固定量が増すものと考えられる。

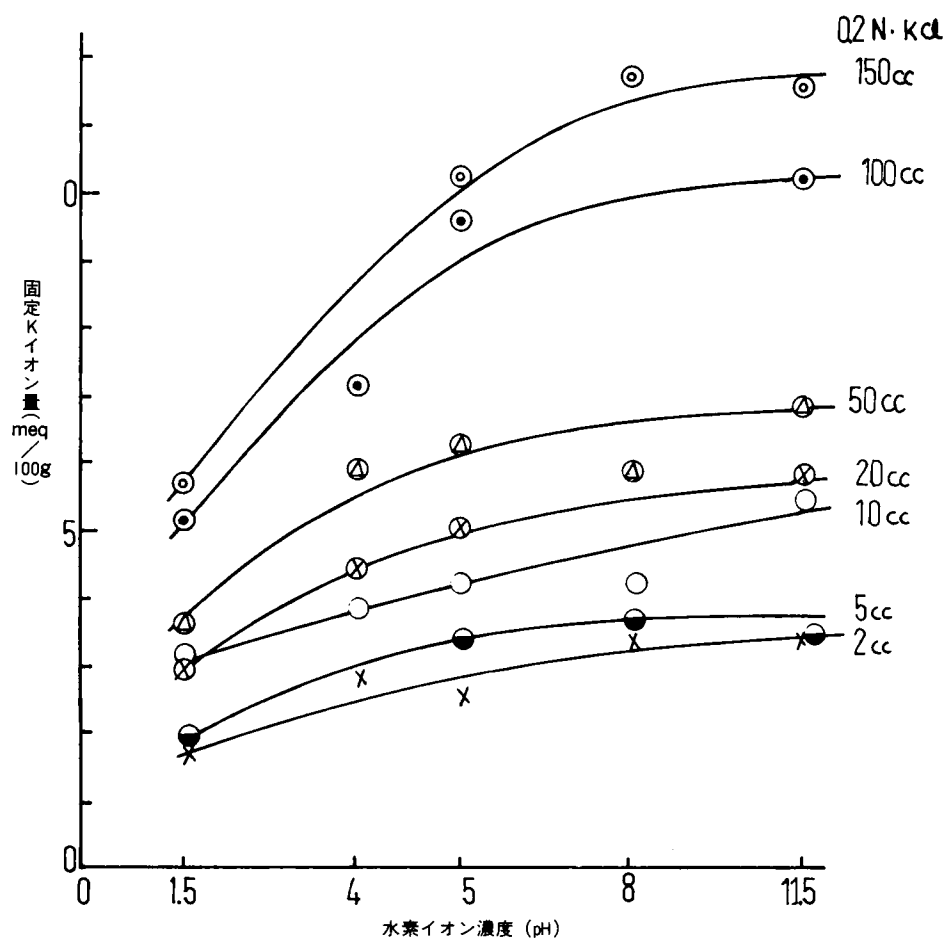


図-4-5 水素イオン濃度と固定 K イオン量の関係

(3) 塩基の影響

吸収あるいは添加された陽イオンの固定力はそのイオンの置換力あるいはコロイドに対する親和力によって変る。K の固定力も同様で、既存の吸着カチオンが影響を与える。Wiklander¹²⁾の実験によると、雲母粘土を21日間65~70℃で HCl, NaCl, NH₄Cl, CaCl₂ で処理すると、固定された K は放出されて、粘土は他のカチオンで飽和された。これに、また K を加えると、H, NH₄ で前処理されたものは固定量小さく、Ca では大で、Na で処理したものは固定量が著しく大きくなったと報告している。筆者は、土質安定上効果の著しい消石灰 (Ca(OH)₂) との併用による K 固定の増大実験を行なった。

(a) 試料の作成と実験方法

水酸化カルシウムを重量百分率で 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10% と変化させてモンモリロナイトと均等に混合したものを各 5 g 正確にとる。つぎに、それぞれの試料に 0.2 N 濃度の塩化カリウム溶液 20cc を加え、気乾させる。この気乾試料を前述と同様の方法で、遊離 K イオン量、吸着 K イオン量および固定 K イオン量を測定した。

(b) 実験結果と考察

結果は表-4・3, 図-4・6, 4・7, 4・8に示すごとくである。遊離Kイオンに対するCa量の影響は, Ca量の増大に伴って, 遊離Kイオン量が増大する。これは, 試料中のCa濃度との平衡関係にもとづいて吸着しきれないKイオンが遊離された状態で存在するものと考えられる。これは図-4・7にも明らかにみられ, Ca量の増大にともない, 吸着Kイオン量はほぼ直線的に減少している。

表-4・3 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の含有量と遊離・吸着・固定Kイオン量の関係

試料中における $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の含有量%	遊離Kイオン量 (m.e.q./100g)	吸着Kイオン量 (m.e.q./100g)	固定Kイオン量 (m.e.q./100g)
1	34.23	46.03	4.30
2	34.48	45.70	4.38
3	34.59	45.31	4.76
4	34.63	44.86	5.07
5	34.68	44.00	5.88
6	34.78	42.84	6.94
7	34.88	41.75	7.93
8	35.14	41.63	7.79
9	35.25	41.47	7.74
10	35.86	41.12	7.58

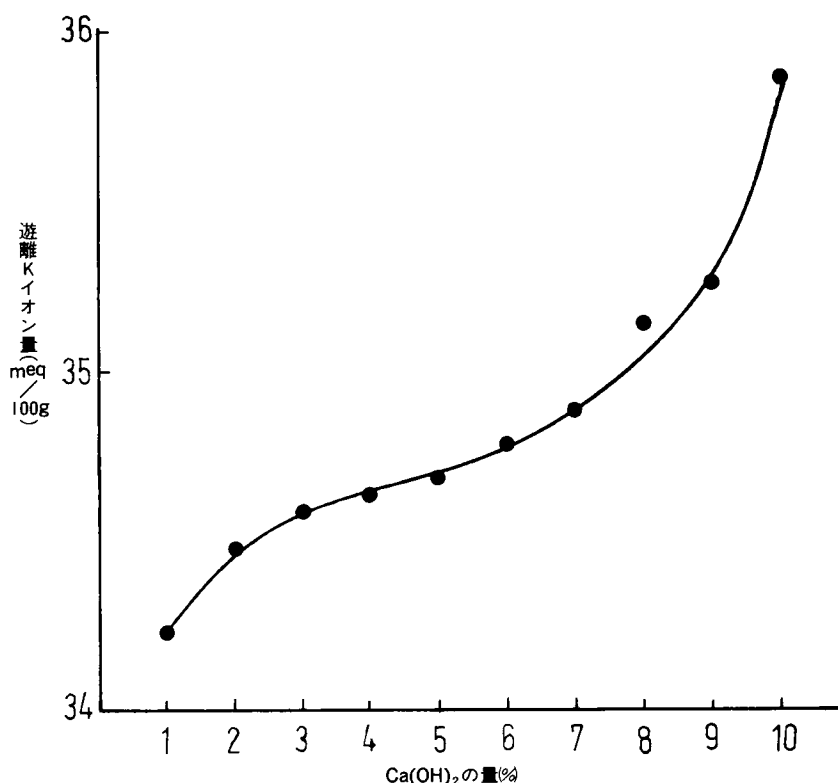


図-4・6 Ca量と遊離Kイオン量

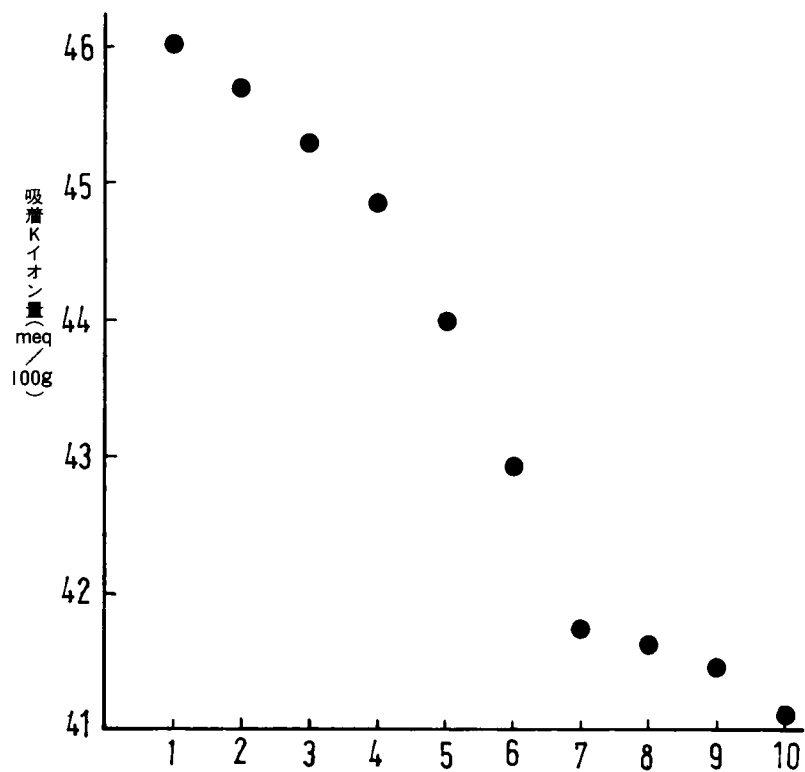


図-4-7 Ca 量と吸着 K イオン量

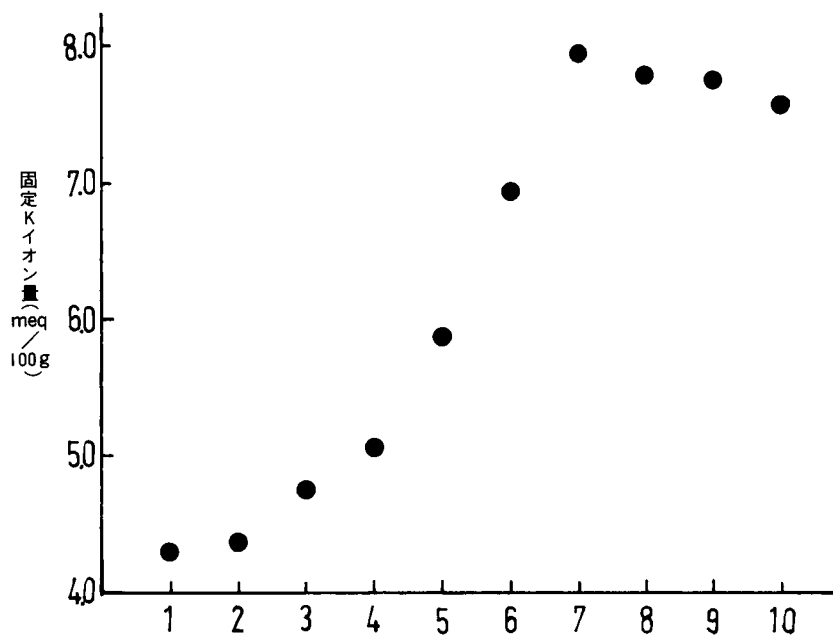


図-4-8 Ca 量と固定 K イオン量

固定 K イオン量は Ca イオン量の増大にともない多くなる傾向があるが、Ca 量 7 % を境界にして漸減の傾向がみられる。Ca イオンは K-固定を促進させる機能を有してはいるが、吸着 K イオン量でも明らかなように、粘土の交換複合体に侵入することのできる K イオン量は Ca イオンの存在により規制される。したがって、その増大の程度は、Ca イオンと K イオンの濃度の平衡関係に大きく左右される。Ca イオンが K-固定を増大させる原因として次のように考えられる。溶液中のイオンは水分子をひきつける。各イオンの水分子をひきつける力は、イオンの電荷(z)に比例し、半径(r)に反比例する。したがって、 Ca^{2+} と K^+ を比べた場合、 K^+ のイオンポテンシャル(z/r)は 0.75、 Ca^{2+} は 1.9 と Ca^{2+} の方が大きい。イオンポテンシャルが大ということは、より多くの水分子をひきつける能力があり、それだけ粘土鉱物の層間を拡げることになり、 K^+ が層間に近づき易くなる。したがって、粘土が乾燥されるにつれて、水分子がとばされ、 K^+ の固定がより促進されることになる。

(4) アニオンの影響

アニオンの種類も K-固定に影響する。Deturk⁽¹⁰⁾ らによると、KCl として加えられた場合、K-固定量は最も弱く、 K_2SO_4 で加えると、非常に良く固定する。筆者の実験では、 $\text{KHSO}_4 > \text{K}_2\text{S}_2\text{O}_7 > \text{K}_2\text{SO}_4 > \text{K}_2\text{CO}_3 > \text{KCl} > \text{K}_3\text{PO}_4$ の順に固定量が増大した。

4.1.4 K-固定による物理化学的特性の変化⁽¹¹⁾

(1) K-固定量と塩基置換容量 (C.E.C.)

(a) 試料の作成と実験方法

試料の作成は前節と同様に、添加量及び pH の異なる 40 個の試料を準備した。C.E.C. の定量は上記試料より 2 g を正確に測り、蒸留水でよく洗浄した三角ろ斗に入れ、これに CaCl_2 1 規定溶液をろ液が約 250cc になるまで流す。つぎに遊離している過剰の Ca^{++} をアルコール及び蒸留水で十分洗浄する。さらに吸着した Ca^{++} を置換抽出するために、酢酸アンモニウム 1 規定溶液を、ろ液が約 300cc になるまで加え、抽出液の量と液中の Ca^{++} 濃度を正確に測定し、粘土 100 g 当りのミリグラム当量で表わしたのが C.E.C. の値である。

(b) 測定結果と考察

測定結果は図-4・9、4-10 に示している。図-4・9 は K 添加量と C.E.C. の関係をプロットしたものであるが、C.E.C. は K 添加量の増大に伴い減少する傾向がある。しかし、その減少傾向も未処理 モンモリロナイトの C.E.C. である 100 m.e.q./100 g (KCl で 20cc) を越えると頭打ちになる。また、pH によって C.E.C. の値が異なるのは、弱酸で処理したもの (pH = 5.5) は⁽¹³⁾、試料を被覆している不純物、主として鉄およびアルミニウムの水酸化物を除去したことによる。pH の影響も K 添加量が著しく増えれば一定の C.E.C. に近づく。この値はほぼイライトの C.E.C. に等しい。

図-4・10 は K-固定量と C.E.C. の関係を示しているが、K-固定量が 5 ~ 6 m.e.q./100 g に達するまでは、C.E.C. はほぼ直線的に減少し、それ以後は減少率が小さくなる。このことから、原試料の C.E.C. の 4 ~ 5 % 以上 K が固定されると、C.E.C. はほとんど変化しないことが明らかになった。

(2) K-固定による粘土構造の変化

粘土鉱物の構造の変化を調べる方法は X 線回析と示差熱分析とがある。それぞれの試験に用いた試料は pH 未調整のモンモリロナイトを 0.2 規定の KCl 溶液 150cc で処理し、過剰の K^+ を洗浄した後に、気乾した状態の K-固定土を用いた。

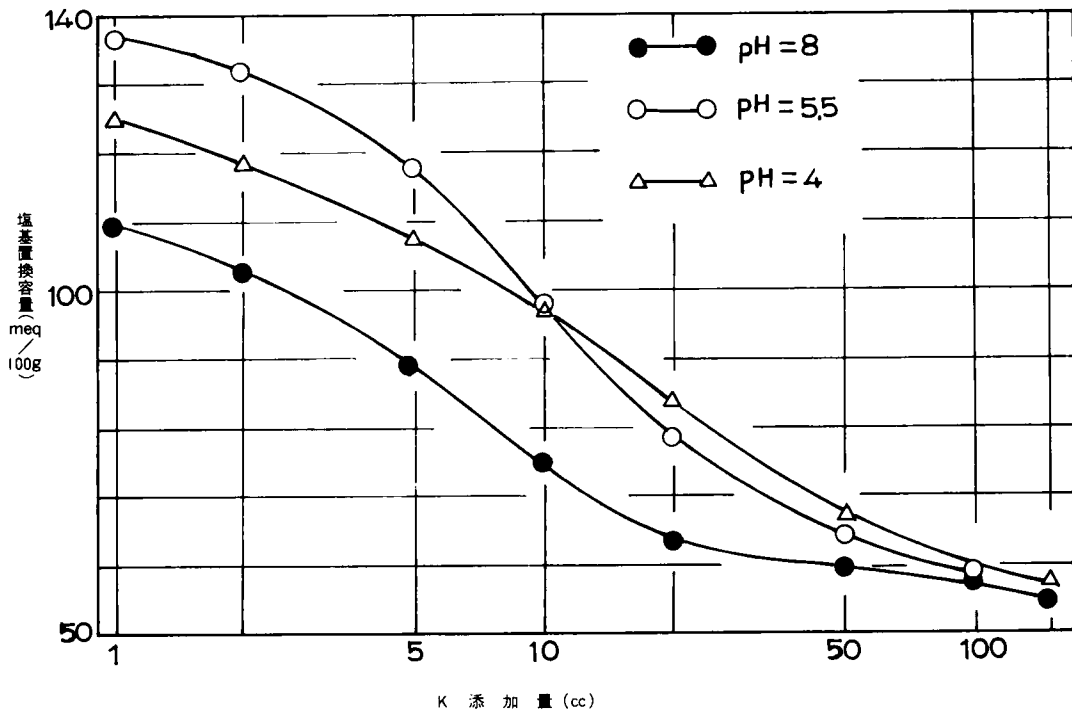


図-4-9 K添加量と塩基置換容量

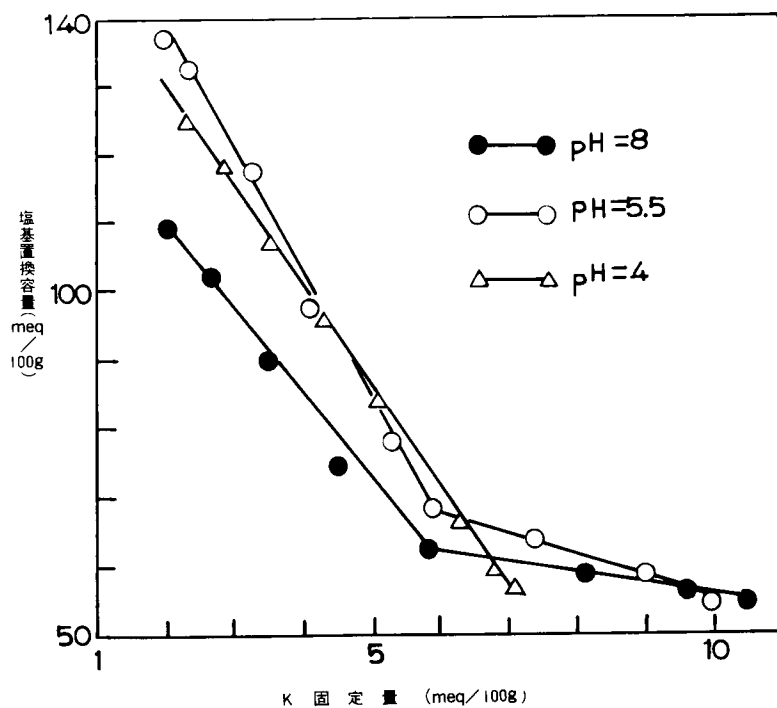


図-4-10 K固定量と塩基置換容量

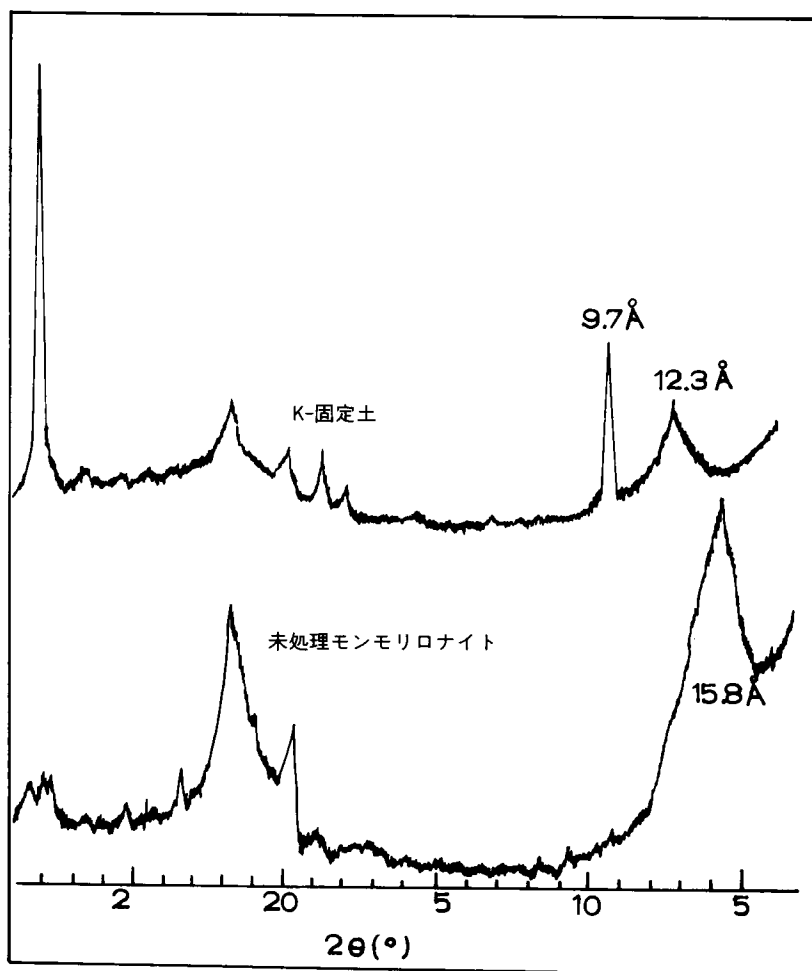


図-4・11 X線回析結果

図-4・11はX線回析結果であるが、K-固定土はモンモリロナイトの(001)面のピークがずれて、層間隔が12.3Å（層間に1分子の水分子を含んだ状態）に縮小すると共に、9.7Åのイライトに近い構造の粘土鉱物ができている。また、(001)面のピークが非常に小さくなっていることから、モンモリロナイトの含有量の減少とともに、イライトに近い粘土鉱物の生成があったと理解できる。

種々のカチオンで飽和されたモンモリロナイトの気乾状態と湿潤状態での層間隔はBarshad^{(14),(15)}の研究があるが、筆者のデータと合わせて表-4・4に示す。

表-4・4 吸着イオンの種類と水浸によるモンモリロナイトの層間隔の変化(Å)

処理法	吸 着 イ オ ン							
	Mg	Ca	Ba	H	Li	Na	K	NH ₄
気 乾	14.8	15.1	12.9	14.5	13.4	12.2	12.3	12.1
水 浸	20.7	17.9	18.5	19.3	18~23	18~24	13.2	13.2

この表に示すように、固定反応に関与するイオンは気乾湿潤に関係なく、層間隔の変化のないのが特徴である。

図-4・12は示差熱分析の結果であり、K-固定土ではモンモリロナイト特有の680℃付近のOHの形の結晶水の脱水による吸熱ピークが小さくなり、イライト系粘土特有の550℃付近の脱水・吸熱ピークが新たに生じている。さらに層間の吸着水は110℃付近のピークの大きさからみて、K-固定土は減少している。

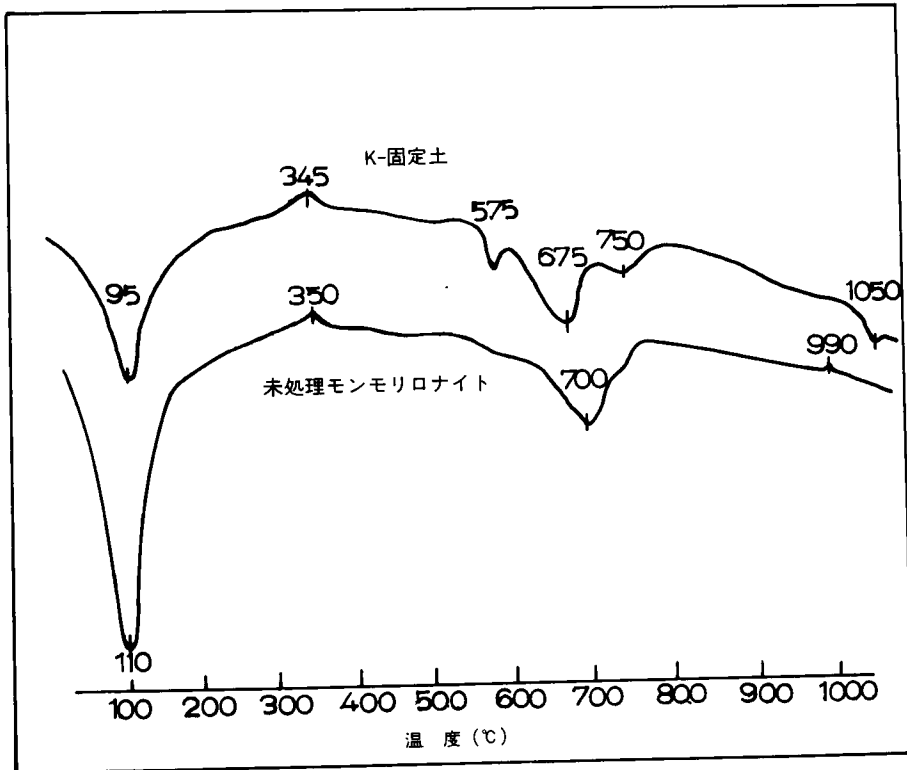


図-4・12 示差熱分析結果

(3) 比表面積

比表面積とは、固体がもつ1 gあたりの表面積のことであり、カリウムが層と層の固定機能を有するとすれば、当然比表面積に変化が見られるはずである。

粉体または多孔性物質の表面積は、試料上への単層のガス分子、いわゆる単分子層を形成するのに必要なガスの量を求めることによって測定される。測定理論は以下のようである。

固体表面上へのガスの吸着を表わした BET の式は以下のように表わせる。

$$\frac{P/P_s}{V(1 - P/P_s)} = \frac{1}{W_m C} + \left(\frac{C-1}{V_m C} \right) \frac{P}{P_s} \quad (1)$$

V : 圧力 P で吸着したガスの体積

P_s : 飽和圧力 (吸着温度での液化ガスの蒸気圧)

V_m : 吸着分子層を形成するのに必要なガスの体積

C : 定数

窒素ガスは $C \gg O$ なので、(1)式は次のように書ける。

$$V_m = V (1 - P/P_s) \quad (2)$$

これより吸着された試料の表面積 S は次式から得られる。

$$S = \frac{1.62 \times 10^{-20} \times 6.023 \times 10^{23}}{22414} V (1 - P/P_s) \quad (3)$$

ここで、 1.62×10^{-20} : ひとつの吸着分子の占める面積

6.023×10^{23} : アボガドロ数

22414 : 標準状態でガス1グラム分子量によって占められるリットル数

比表面積測定用の試料は、原試料（含水比150%）にアルコールを加え十分攪拌した後、遠心ろ過する。これを気乾して含水比を10%前後にしたものを使用した。アルコールは試料をそのまま気乾させたとき、水分子のもつ極性によって粒子が団粒化し表面積が減少するのを防ぐために加えた。

実験結果を図-4・13に示す。全体として末処理のモンモリロナイトの比表面積（100～120 m^2/g ）よりも小さくでているが、添加量と共にむしろ漸増していく傾向がある。この事については今後の研究にゆだねざるを得ない。

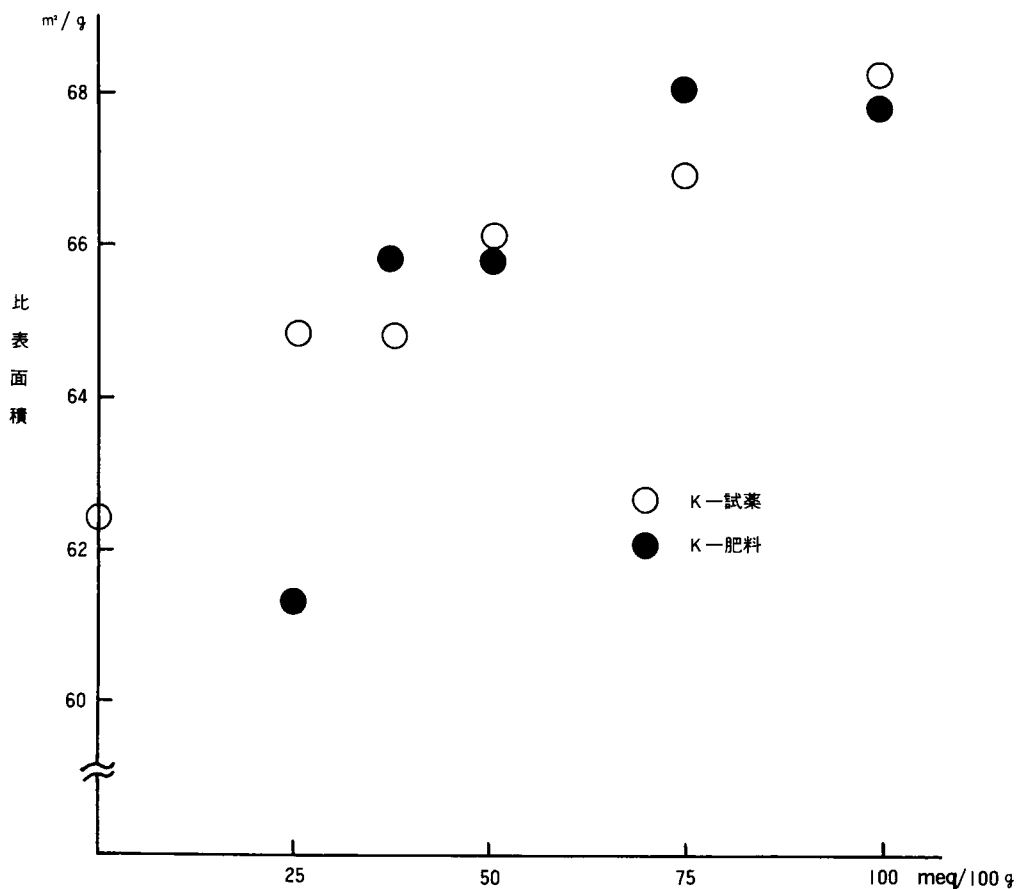


図-4・13 K 添加量と比表面積

(4) ま と め

K-固定による物理化学的特性の変化は、要約すればモンモリロナイト粘土鉱物のイライト系粘土鉱物への変化と言える。

この事は塩基置換容量、X線の特性、熱的特性及び比表面積などの数値からも明らかである。

4.1.5 工学的諸特性の変化

前節までに明かなように、K-固定によるモンモリロナイトの物理化学的特性の変化には著しいものがある。これが工学的特性にどのように影響するかを以下に実験的に示す。

K-固定土は通常使うことのできる塩類の中で最大の固定量を示した塩として、1規定の K_2SO_4 で処理したものをうい、試料の間げきに存在する過剰のKイオンはメチルアルコールで洗浄した。

(1) 粒度特性

粒径加積曲線を図-4-14に示したが、K固定により、細粒粘土分（ 2μ 以下）が顕著な減少を示している。これは吸着Kイオンにより、粘土粒子間の電位が低下し、粒子間の反発力が弱まり、粒子が集合体を形成したことと、粘土粒子個々の層間にKイオンが固定されたことによって、固結・団粒構造化したものと考えられる。なお、分散剤としてはピロリン酸ナトリウムを使用した。

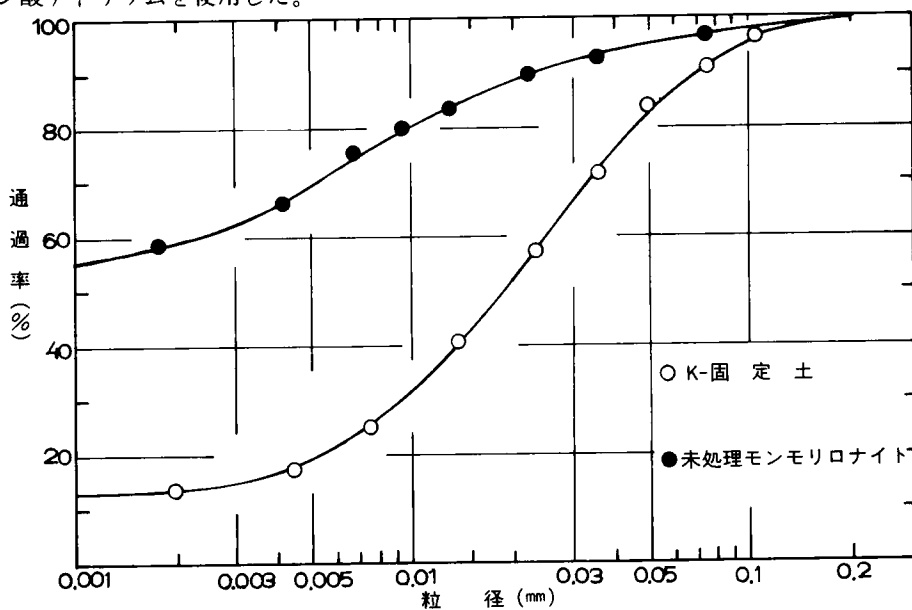


図-4-14 粒径加積曲線

(2) 膨潤特性

(a) 自由膨潤

図-4-15は膨潤量と塩濃度の関係を示している。この試験は100ccの各種濃度の塩溶液を入れたメスシリンダー中に、5分ごとに10mgずつ合計2gの試料を投入し、24時間後の体積を測定し、その値を膨潤量としたものである。K-固定土は溶液塩濃度の如何にかかわらず一定の膨潤量を示しており、未処理の場合はその影響は極めて大である。また、蒸留水中で行なった結果では、未処理11.2cc/gに対し、K-固定土4.2cc/gとK-固定による膨潤抑制効果は著しい。

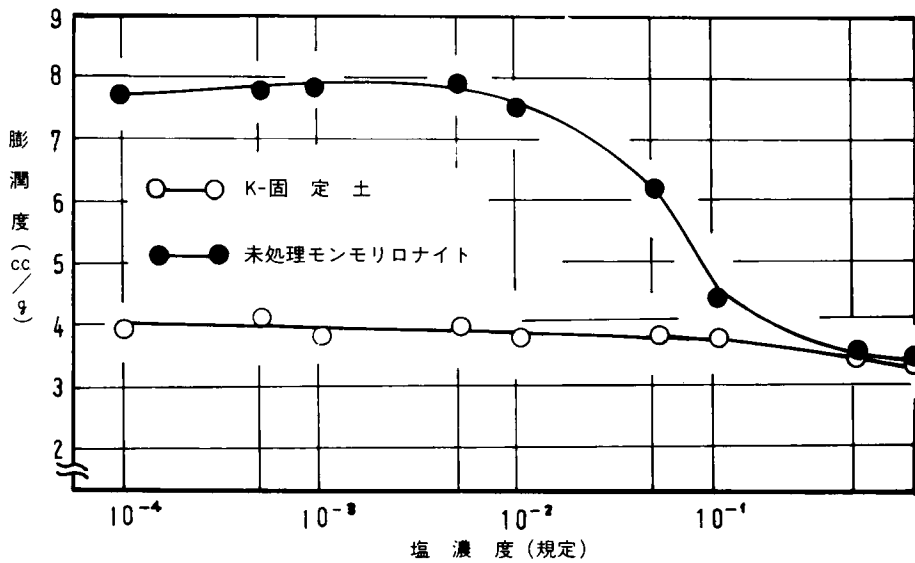


図-4.15 膨潤度と塩濃度

(b) 圧密-除荷による膨潤特性¹⁶⁾

膨潤性を検討するための試験法が種々提案されているが、まだ統一されたものはない。そこで筆者は圧密-除荷によるリバウンド曲線の比較によった。実験は圧密試験器を用い、1段階24時間、8段階(0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2, 6.4, 12.8kg/m²)に分けて圧密し、その後1段階24時間で除荷、7段階ごとの膨潤量を測定した。

試料は、未処理土、K処理50 m.e.q./100 g、100 m.e.q./100 gの3種を初期含水比(w_0) 170%, 120%の2種類の計6種類を用意した。

試験結果を図-4.16に示しているが図の横軸は過圧密比(OCR)で縦軸にCsをとっている。添加量による差はあまりないが、無処理土と比較して、K-固定による膨潤抑制効果が見られ、処理土のCsは無処理土のCsに対し、OCRが10付近で70~80%、100付近では50~60%にまで減少する。

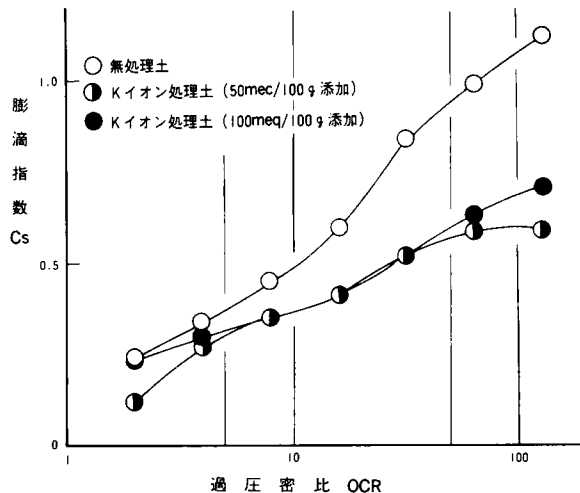


図-4.16 過圧密比と膨潤指数の関係

(3) アッターベルグ限界

試料土のアッターベルグ限界を表-4.5に示したが、K-固定土は未処理に比較して非常に小さい。これは粒度分布から明らかなように、細粒土の含有量の差異にもとづくものと考えられる。

表-4.5 アッターベルグ限界 (%)

試 料	LL	PL	PI
未処理土	243	31	212
K-固定土	79	39	40

(4) 締固め及び一軸圧縮強度

ハーバード型小型突固め試験による結果を図-4.17に示す。最適含水比はK-固定土で34%，未処理土で40%，最大乾燥密度はそれぞれ、1.29、1.16 g/cm³である。締固め曲線の形は粗粒部が増大すると、左上方に上るとともに、ピークが急峻になるが、K-固定土はこの面からも、団粒・固結化していることが明らかである。

また、未処理土の低含水比領域における極小値はProcterの毛管説によると、粒子のすべての接触点でメニスカスが形成される点である。したがって、A-B間にはたわみにくいメニスカスが形成され、有効応力が増大し、乾燥密度が減少する区間であると説明される。K-固定土の極小値は未処理土よりもさらに低い含水比で表われると予測でき、メニスカスの形成に要する水分が少量で良いことから、比表面積の減少を証している。

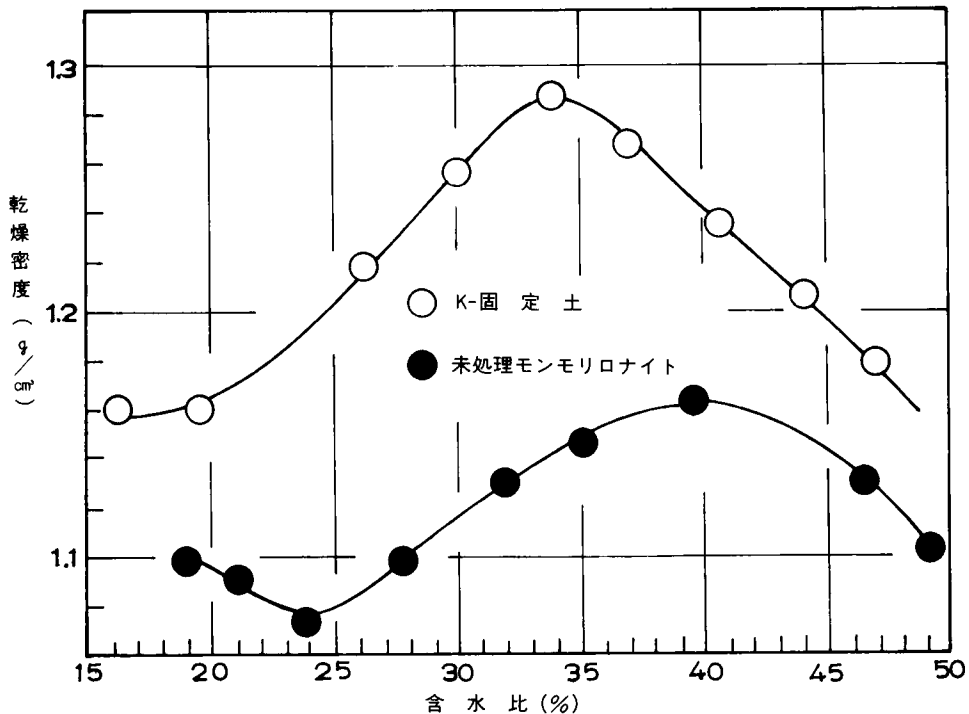


図-4.17 締固め曲線

一軸圧縮強度の関係でも、上記と同様のことがいえる。K-固定土では曲線の形がシャープに、未処理土では、ブロードに出ている。また、応力-ひずみ関係では、K-固定土の場合、ピーク強度が高く、残留強度が非常に小さく出た。一方、未処理土の場合、ピーク強度と残留強度にあまり差異がなかった。結局、K-固定土は材料強度特性として、強度が増大すると共に、比較的ブリッキーなものとなる事を示している。

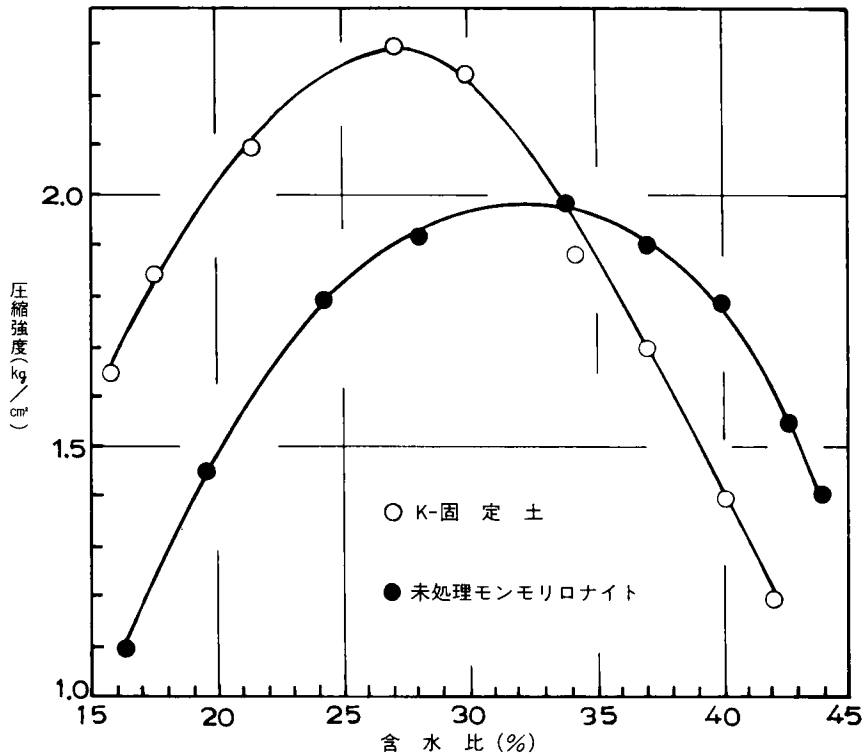


図-4-18 一軸圧縮強度

(5) 圧密および透水性

圧密試験のための試料は、K-固定土、未処理土のいずれも液性限界付近の含水比に調整したのを用いた。K-固定土の透水係数は、未処理土と比較して、どの荷重段階においても、オーダーで3段階大である。このことから、K-固定による土質安定では、液性限界付近の含水比での土性改良効果が最も著しいといえる。また、K-固定土においては、圧密荷重が0.8kg/cm²から透水係数の変化率が急になっている。これは飽和吸着Kイオンによる団粒効果がこの荷重段階で破壊されることを示している。

また、ここには示さなかったが、 e -Log P 曲線から判断して、K-固定土が100%圧密に達するのが早いことと、顕著な結合力破壊を示す変曲点が表われないことより、初期配向構造であると推定できる。一方、未処理土は、100%圧密に96時間も要し、結合力の破壊もみられることから、初期線毛構造であったと考えられる。

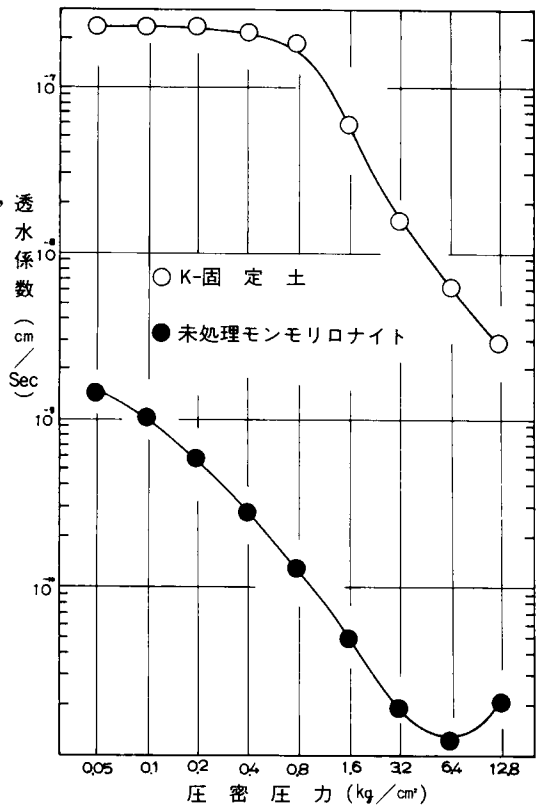


図-4-19 透水係数と圧密圧力

4.1.6 結 語

モンモリロナイトを含む軟弱粘土の土質安定工法と、工学的な材料として利用する方法として、K-固定法を示してきた。従来から、膨張性頁岩や泥岩、地すべり粘土などを扱うにあたっては、直接的な安定処理でなく、間接的な抑止工法が採られてきた。したがってそのための経費は莫大なものであった。しかるに本法はカリウムイオンを含む塩類（市販されているものとしては、カリ肥料および凍結防止剤）を注入もしくは混合すればよく、その経費は著しく少く、極めて有利なものである。

以下に要約を示し、結語に代える。

K-固定量の大小に影響する要因としては各種のものがあるが、次のような結果が得られた。

- (1) K-固定は含水比の影響を受けるが、乾燥が不可欠の条件ではない。これには時間的な影響があり、湿潤状態であっても長期にわたってK-処理を行えば、固定が起る。
- (2) K-固定量を増大させるのに最も経済的なK添加量が存在し、それは対象粘土の塩基置換容量にほぼ等しいK添加量である。
- (3) アルカリ状態でKを処理すると、K-固定量が増大する。
- (4) 事前に吸着しているカチオンに関しては、H、K、 NH_4 の吸着量が多いと、K-固定量が減少し、CaとNaが多いと増大する。
- (5) アニオンの影響は、 $\text{HSO}_4^{-1} > \text{S}_2\text{O}_7^{-2} > \text{SO}_4^{-2} > \text{CO}_3^{-2} > \text{Cl}^{-1} > \text{PO}_4^{-3}$ の順に固定量が増大す。

K-固定による物理化学的特性の変化は、

- (1) 試料土の塩基置換容量を著しく減少させる。
- (2) モンモリロナイトの層間隔が、乾湿によって変化せず、常に水を1分子含んだ状態の12.3Åになる。
- (3) X線回析を行なうと、9.3Å付近のイライトに近い構造のピークが表われる。
- (4) 熱的な性質では、100℃付近の吸熱ピークが減少するとともに、モンモリロナイト特有の680℃付近のOHの形の結晶水の脱水による吸熱ピークが小になり、イライト系粘土の550℃付近のOHの脱水・吸熱ピークが新たに生じる。

K-固定による工学的特性の変化は、

- (1) 粒度特性の著しい変化がみられ、 2μ 以下の粘土分が異常に減少する。
- (2) 膨潤特性は未処理の約 $\frac{1}{3}$ で塩濃度の影響をほとんど受けない。
- (3) アッターベルグ限界は、L.L.の減少が著しく、未処理の約 $\frac{1}{3}$ になる。
- (4) 最適含水比が減少し、最大乾燥密度が増大する。
- (5) 一軸圧縮強度が大になるとともに、ブリッキーな材料になる。
- (6) 透水係数は未処理に比べて、オーダーで3段階大になる。

4.2 イオン交換工法

4.2.1 イオン交換と吸着

粘土鉱物は各種の陰イオンや陽イオンを吸着する性質を有しており、これらのイオンは交換可能な状態で保持されている。この交換反応は化学的なもので単純な吸着とは異なるが、両者の差異については、イオン交換の反応過程が吸着あるいは脱着によって起る為に判別することは困難である。イオン交換反応中の放出熱は、イオン交換が中和のような反

応にもとづくものでなければ、通常± 2 K cal/mole よりも少し小さい (Helfferick¹⁷⁾)。

交換性イオンは、珪素・アルミナ粘土鉱物構造単位の外部に吸着しており、交換反応により、珪素・アルミナ構造に影響を与えることはない。単純でよく知られているイオン交換反応の例としては、活性炭や沸石を用いた硬水の軟水化が挙げられる。

試料の交換能力は試料 1 g あるいは 100 g あたりのミリグラム当量で表わされ、例えば、100 g に対し 1 m.e の Na^+ の割合は Na_2O として 0.031% となる。

粘性土において一般的な交換性カチオンを多い順に並べると、 Ca^{++} 、 Mg^{++} 、 H^+ 、 K^+ 、 NH_4^+ 、 Na^+ が挙げられ、陰イオンとしては SO_4^{--} 、 Cl^- 、 PO_4^{3-} 、 NO_3^- 等がある。

(1) イオン交換の重要度

粘性土の物理的特性は粘土に吸着している交換性イオンに依存するところ大である。一般に粘土あるいは粘性土の塑性特性は交換性カチオンが Na^+ か Ca^{++} かによって極端に異なる。従って、陶芸家は塩基置換反応を利用して、必要な塑性を得ている。又練瓦の製作においても粘土の塑性特性を改良するために、ソーダ灰を加えたりしている。建設技術者も又、施工目的に合致するように、土材料特性を変化させることがある。

建設現場においても、コンクリートの打設により、予期しない地下水位の変動をもたらすことによって、土のイオン交換反応をひき起すことがあり、この交換反応によって土の塑性、締固め及び収縮特性が看過されることがあると、結果として重大な被害のもたされることがある。

ベントナイト系の粘土は特に広範に利用されている。土木の分野ではボーリング用あるいは壁工法における泥水として、その懸濁液のチキソトロピー性を大いに利用している。泥水として利用する場合のモンモリロナイトは交換性イオンとして Na^+ を吸着しているものが最も分散性に優れたものである。

(2) イオン交換現象

(i) 歴 史

イオン交換の歴史を詳細に調査した Kelley¹⁸⁾ によれば、土に交換能力のある事は、かなり古い時代から植物の育成の観察に基づいて発見されていた。その例として、溶液状の肥料が土をフィルターとして、脱色、脱臭される事が数世紀前から既成事実として認められている。イオン交換について組織だって研究を行なった最初の研究者である Thompson¹⁹⁾ は、交換反応を表現するのに塩基置換という言葉を用い、その後水素イオンが交換反応に大きな役割を演じている事を明らかにした。更に、土をアンモニアと混合した後、水で洗浄しても、アンモニアの大部分は保持されたままである事を発見した。

Thompson に続いて、Way^{20),21)} は土のイオン交換が粘土に限られ、土の珪酸塩成分と関係づけられる事を示した。また、

Forschamer²²⁾ は土に吸着した Ca^{++} や Mg^{++} が海水で溶脱する事によって離れてしまう事を明らかにした。その後、多くの研究者が土壌化学の分野で、交換反応の研究を行なってきた。

(ii) 塩基置換能力

表-4・6 に各種粘土鉱物の塩基置換容量を示す。塩基置換容量は鉱物組成によって大きく変化し、モンモリロナイ

表-4・6 各種粘土鉱物の塩基置換容量(m.e.q./100 g)

カオリナイト	3 ~ 15
ハロイサイト (2 H ₂ O)	5 ~ 10
ハロイサイト (4 H ₂ O)	40 ~ 50
モンモリロナイト群	80 ~ 150
イライト	10 ~ 40
バーミキュライト	100 ~ 150
クロライト	10 ~ 40
セピオライト-アタパルジャイト	3 ~ 15

ト型は最高の交換能を示し、カオリナイト群は最低である。この粘土の交換能を直接反映するものとしては、粘土の吸水性がある。一般に交換能が高いほど吸水性が高く、いわゆる表面の活性が高くなる。

また、表の値はpH 7で測定したものであるが、一般に交換能はpHが大になるほど大きな値を示す。

(iii) イオン交換の生ずる原因

粘土鉱物にイオン交換が起る原因として次の3点が挙げられる。

1. 粘土粒子端部で満たされない電荷による破壊部結合によるもの。この原因による破壊部結合の数、すなわち交換能は粒径が小になるほど大きくなる。また、格子がひずむと破壊部結合が増大し、結晶度が悪ければ悪いほど交換能は大になる。

カオリナイトとハロイサイト鉱物の交換能はほとんど破壊部結合による。イライト、クロライト及びセピオライトーアタパルジャイト鉱物においては、交換能の主たる要因は破壊部結合である。イライトやクロライトの結晶度の悪い場合に、一部格子内の置換による電荷が生ずる。

モンモリロナイト群とバーミキュライトは、破壊部結合は比較的少ない(±20%)。残りの電荷は格子内の置換によって生じる。

破壊部結合は間げき水からHイオンとOHイオンをけん引する。このうちHは他のカチオンと置換されうる。この場合のH⁺は通常、H⁺・H₂OあるいはH₃O⁺のようなヒドロニウムイオンの形で存在する。このH置換の容易さ、すなわち、結合エネルギーに寄与する負の電荷はpHの増加に伴って増大する。カオリナイトのpH 4以下の特異な綿毛化は上述の正と負の電荷のけん引に基づく綿毛化である。pHが7以上では、カオリナイト層の面上に露出されたOHイオンがイオン化される可能性があるため、Hが奪われ負電荷が生じる。

2. 粘土鉱物の四面体層Si⁴⁺に対するAl³⁺、八面体層Al³⁺に対するMg²⁺、Fe²⁺による格子内の置換によって生ずる負電荷に釣り合うために正電荷が吸着する。これが同形置換であり、鉱物の結晶化あるいは生成の間に起る。

八面体層の置換による交換性カチオンは四面体層の置換によるカチオンとは電荷間の距離にかなりの差があるために、後者に帰因する電荷は前者によるものよりも強く保持されることになる。この例の一つとして、実質的に非交換性であるイライト系粘土のカリイオンの固定が挙げられる(4.1参照)。八面体層における置換が塩基置換容量の大部分を占める。

3. 露出水酸基の水素(破壊部結合によるものよりも構造内部の)が交換性カチオンによって置換される場合。カオリナイトとハロイサイトは基本壁開面の片側に水酸基層があるために、この原因による負電荷が生じる。

iv) 交換性カチオンの位置

破壊部結合によって塩基置換の起る粘土鉱物では、交換性のカチオンは板状あるいは中空状単位の端部に位置する。置換が格子内置換による粘土では、カチオンはほとんど基本底面にある。モンモリロナイトとバーミキュライトでは、約80%が層間に、残りは端部にある。イライト、クロライトおよびセピオライトーアタパルジャイト鉱物では、カチオンのほとんどは端部で、残りわずかが層間に存在する。WeissとRussow²³⁾は、カオリナイトの交換性カチオンが硅素四面体単位の底部酸素面にのみ存在するので、塩基置換容量はカオリナイト粒子の厚みで決まると結論づけている。

吸着水が比較的少ない粘土塊すなわち、塑性が発揮できないような水量の粘土において

は、板状粒子の端部の吸着カチオンは直接に接触して保持されているか又は粘土鉱物面に非常に近接して存在している。同様の条件の水分状態のモンモリロナイトの吸着カチオンは粘土鉱物間の中に保持されている (Brown²⁴⁾)。水が1分子しか存在しないほぼ無水状態のモンモリロナイトでは、 Na^+ は四面体層の酸素が形成している六角形の孔内にあり、 Ca^{++} も又同じ位置に存在する。

粘土が塑性状態になるような含水量のときには、交換性カチオンは鉱物面からかなり離れており、鉱物面とカチオンの間には水分子が入り込んでいる。

v) 交換反応速度

塩基置換の速さは、粘土鉱物の種類、カチオンの特性と濃度及びアニオンの特性と濃度によって変化する。一般にカオリナイトの反応速度は最も速く、ほとんど即時に起る。モンモリロナイト群とアタパルジャイトはカオリンよりも時間を要すが、イライトの場合、数時間あるいは数日要することがある。粒子端部の電荷は速く交換されるが、モンモリロナイトのように層間に位置する電荷の交換は時間がかかるようである。

イオン交換反応は拡散過程にあたる。従って、その速度はイオンの可動性にかかっている。このようにイオン交換動力学は通常の意味での化学反応動力学と異なるが、例外的に拡散速度遅失が起る。

モンモリロナイトのように交換反応が膨潤を伴う、すなわち、安定した層間距離から異なった活動エネルギーによる距離への変化を伴う時は、一種のヒステレシス現象が観察される。

Walker²⁵⁾は、モンモリロナイトやバーミキュライトのカチオン置換が単位構造のC軸方向の変化を伴ない、これがイオン交換の速度に影響を与えると結論づけている。例えば、バーミキュライトの層間カチオンのMgをSrに置換させると、Mgに比べ0.6Å径の大きなSrのために、層間距離は14.4から15Åになる。

結晶格子の収縮を伴う交換反応もあるが、この場合は、膨潤を伴う交換反応に比べ、交換反応速度は小さくなる。

vi) 交換性カチオンの置換度

カチオンの置換能力は非常に重要な問題であり、これに関する研究は多く報告されている。しかし、置換能力については完全に解明されておらず、これに影響する因子は多々あるために、非常に限られた条件内での置換能力だけは明らかにされている。以下にその条件に関する考察を示す。

濃度の影響

KelleyとCummins²⁶⁾は、California州のYoloの土での Ca^{++} と Mg^{++} に対する Na^+ の置換で溶液中の Na^+ 濃度が大になればなるほど置換能力の増すことを明らかにした。他にGedroiz²⁷⁾は、チエルノーゼム土で、 Ca^{++} と Mg^{++} に対する NH_4^+ による置換で同様の結果を示している。一般的に、置換カチオンの濃度が大になれば、置換力が増大する。

置換位置の既存カチオンの影響

JennyとAyers²⁸⁾は、イオン放出の容易さはイオン自身の性質だけでなく、交換位置の残りを占めている他のイオンの性質と置換イオンが交換位置を占める程度によって決まると結論づけている。例えば粘土鉱物に吸着している交換性カルシウムの量が少なくなると、それにも増してカルシウムを放出させる事は困難になる。一方、 Na^+ の場合は、吸着量が小さくなるほど、放出されやすくなる。 Mg^{++} と K^+ の場合は、 Ca^{++} 、 Na^+ ほど吸着量による影響は受けない。

置換溶液中のアニオンの影響

Na モンモリロナイトを Ca^{++} で置換する場合、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液か CaCl_2 溶液のどちらを用いるかによって置換度はかなり異なる。塩基置換容量の測定でも用いる中性塩の種類によって違った結果がでる。この影響については未だ定性的にも明らかな結果はでない。

イオンの性質

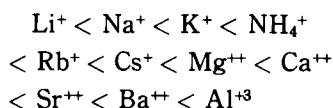
他の条件が全て同一の場合、イオンの電荷が高ければ高いほどその置換能力が大であるし、すでに吸着している場合には置換され難い。しかし、 H^+ だけは 2 価あるいは 3 価イオンと同様の挙動を示すため例外になる。

Kelley¹⁸⁾ は、電荷の等しいイオンの置換能力は原子量の大きさに伴う事を明らかにした。更に、同じ電荷のイオンでも、イオン径が大になるほど置換能力は増す。

Wiegner と Jenny²⁹⁾ は、置換能力が非水和イオン径よりも水和イオン径の方が大きな影響を持つことを示した。電荷の等しいイオンでは、水和が最も少ない場合に最大の置換エネルギーを持ち、すでに粘土に吸着している時には、最も置換され難くなる。従って水和イオン径が大なほど置換され

易く、置換能力が小さくなる。

置換能力は近似的に次の順序で増す。



粘土鉱物の性質

すべてのカチオンの置換能力は吸着複合体（粘土＋吸着カチオン）の特性によって変化することは初期の多くの研究者によって明らかにされている。その代表的なものとして、Schaftschabel³⁰⁾が行なった NH_4^+ モンモリロナイトの実験結果を図-4・20に示す。図から明らかなように、 H^+ と K^+ はほぼ同じ交換能力をもち、 Rb^+ と Cs^+ を除いて 1 価イオンは 2 価イオンよりも交換能力は低い。

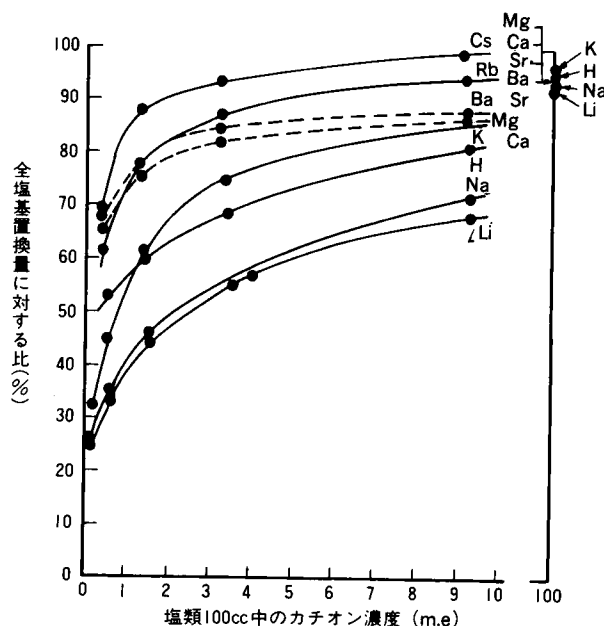


図-4・20 NH_4^+ モンモリロナイトのアルカリ塩とアルカリ土類塩によるイオン交換 (Schaftschabelより)

4.2.2 粘土の工学的特性に及ぼす吸着イオンの影響

(1) 試料の調整法と試験方法

本研究に用いた試料は市販のベントナイト及びカオリナイトとモンモリロナイトとカオリナイトの混合物である。それぞれの試料に CaCl_2 , NaCl , MgCl_2 の 1 規定溶液で加え、約 2 日間放置した後、余分の塩類は蒸留水＋アルコールで洗浄した試料を気乾状態にして用いた。

試料の吸着カチオンの定量結果を表-4・7に示した。これから明らかなように、用いたモンモリロナイトはNa⁺が非常に多く吸着している。また、モンモリロナイトおよびモンモリロナイトとカオリナイトの混合物のNa処理は他の処理と同様の条件で洗浄したにもかかわらず、Na⁺が多く残留している。また、塩基置換容量はモンモリロナイトが91.85 m.e.q./100 g、カオリナイトが5.40 m.e.q./100 g、モンモリ+カオリンが50.73 m.e.q./100 gであった。

表-4・7 試料土の吸着カチオン (m.e.q./100 g)

試 料		K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	合 計
モンモリロナイト	未処理	3.99	77.74	3.65	3.95	89.33
	Na処理	2.32	331.25	3.38	2.59	339.54
	Ca処理	2.48	16.56	132.67	1.54	153.24
	Mg処理	2.72	14.73	3.32	106.21	126.98
カオリナイト	未処理	0.16	0.19	4.71	0.18	5.23
	Na処理	0.96	63.45	0.82	0.11	65.34
	Ca処理	0.22	1.72	44.39	0.13	46.45
	Mg処理	0.90	3.96	1.38	44.41	50.65
モンモリ+カオリン	未処理	1.98	38.83	3.97	2.02	46.80
	Na処理	0.75	214.91	1.44	1.47	218.57
	Ca処理	1.24	4.64	139.52	1.01	146.41
	Mg処理	1.00	4.10	1.76	148.23	155.90

(2) 工学的特性

i) 膨 潤 度

粘性土の膨潤の問題は

- (a) 荷重が減少したり、あるいは地下水が上昇した時などに、飽和粘性土層が膨潤する。
- (b) 降雨や浸透水などによって湿潤化した結果、不飽和粘性土層が膨潤する。

以上2つの場合があるが、(a)は圧密理論を用いて、多くの結果が出されている。また、(b)は物理化学的な現象を含んでいるので、取り扱い是非常に複雑である。膨潤は外力よりも内部分子力の方が大であり、サクション力が重要な要因であると言われている。この事は、最近の研究により、浸透圧が実際に土-水系に発達し、膨潤の原因になることが明らかにされている。この浸透圧はVan't Hoff式で次のように表わされる。

$$P_0 = RT(C_1 - C_2)$$

ここで

P₀ : 浸透圧

R : ガス定数 (Boltzman 定数)

T : 絶対温度

C₁ : カチオン濃度 (mol / ℓ)

C₂ : 間げき水中のイオン濃度 (mol / ℓ)

浸透圧が粒子間に作用する唯一の内圧であるという理論にもとづけば、土に外力が作用すると、粒子間の距離は減少し、水がしぼり出される。その結果、粒子間のイオン濃度が増大し、続いて浸透圧が増大することになる。浸透圧が外力と等しくなった時に平衡に達

する。逆に水が浸透すると、粒子間のイオン濃度が薄くなるために、浸透圧が減少し、粒子間距離が増大し、結果的に体積の増大をもたらす事になる。

粒子相互間の反発力は隣り合った粒子間の拡散二重層の相互作用によって生じる。この作用によって物理的に明らかなことは、粘土が水中で膨潤を起すことである。粒子間の反発力あるいは膨潤力は吸着カチオンおよび間げき水中のイオンの影響を受けるので、体積変化を計算するのは困難である。

実験結果を表-4・8に示す。表から、Na 処理の場合、未処理とほとんど差異がないが、Ca, Mg 処理の場合、膨潤度は極端に低下する。カオリナイトの場合は、非膨潤性粘土鉱物なので、吸着カチオンによる差異は見られない。モンモリ+カオリンではモンモリの膨潤性が影響し、Na 処理の膨潤度は他のものよりも大きい。

表-4・8 膨 潤 度 (cc/g)

試 料	未処理	Na 処理	Ca 処理	Mg 処理
モンモリ	7.0	7.7	3.4	3.5
カオリン	2.4	2.1	2.2	2.2
モンモリ+カオリン	4.3	5.5	3.0	2.6

これらの結果から考えると、膨潤性粘土は粒子のまわりに水を保有する能力だけでなく、結晶に膨潤格子を有し、かなりの水をその層間に保有する能力があり、粒子そのものがふくれ、体積が増大する。とくに Na^+ が吸着していると Na^+ の水和が容易に起なわれ、 Na^+ の水和径が大な為に結晶格子の拡張が他のものよりも大になる。

つぎに各吸着モンモリロナイトの間げき水中の塩濃度による膨潤度の変化を調べた。

図-4・21は未処理モンモリロナイトを NaCl , CaCl_2 の溶液濃度を变化させて膨潤試験を行なった結果を示している。どちらの溶液の場合も塩濃度が低いと高い膨潤度を示しているが、これは低濃度で粘土粒子周辺の拡散二重層の発達に基づく反発力の増大によるものと考えられる。 NaCl 溶液の場合は、 10^{-2} 規定まで膨潤度が増し、それ以後急速に低下している。これは、 10^{-2} N 以下の濃度では、モンモリロナイトの層間カチオンがほぼ Na^+ で飽和されるに至らず、未処理モンモリロナイトの吸着 Na^+ の影響による膨潤量の値のため小さく出るものと考えられる。 10^{-2} N 濃度ではじめて層間カチオンが Na^+ で飽和され、最大の膨潤量を示し、それ以後濃度が増す事によって、拡散二重層の収縮による粒子間の反発力の低下が膨潤量の低下につながっている。

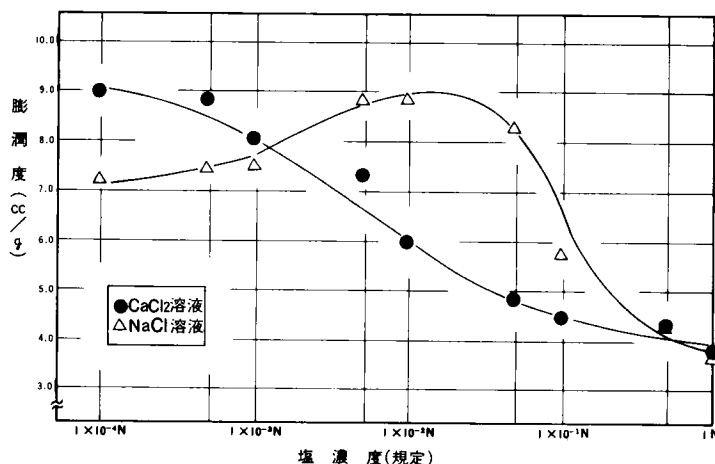


図-4・21 モンモリロナイトの膨潤度における溶液の影響

次に未処理と Ca 処理モンモリロナイトの塩濃度の影響を示したのが図-4.22である。図から明らかなように、未処理の場合は塩濃度の影響を極端に受けるが、Ca 処理したものは塩濃度の影響をほとんど受けない。Ca 処理の場合はすでに層間に十分な Ca^{++} があるために、外溶液からの Ca^{++} の影響は受けないので、一定の膨潤量を示すものと考えられる。

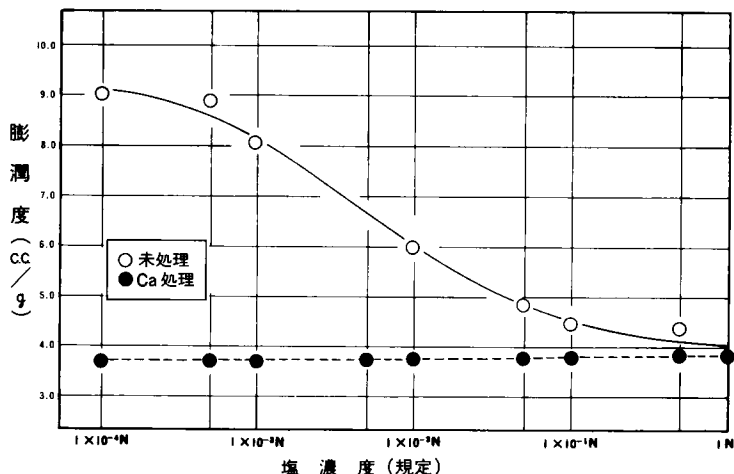


図-4.22 未処理, Ca 処理に対する塩濃度の影響

つぎにカオリナイトの未処理を NaCl, CaCl_2 溶液中に投入した結果を図-4.23に示す。カオリンは非膨潤性粘土鉱物であるので、その膨潤性は溶液の塩濃度の変化によって影響されない。

自由膨潤試験の結果から、膨潤度は含有粘土鉱物、吸着イオンおよび間げき水中の塩濃度によって左右される事が明らかになった。吸着イオンは Na^+ が最大の膨潤度を示し、 Ca^{++} , Mg^{++} は膨潤を抑制する効果がある。又、間げき水中の塩濃度は 0.5 規定以上になれば、吸着イオンに関係なく、膨潤を抑制し、一定の値に落ちつかせる効果がある。

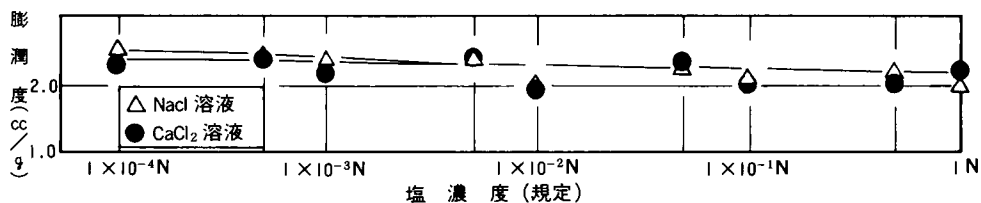


図-4.23 カオリナイトの膨潤度に及ぼす塩濃度の影響

ii) コンシステンシー

代表的な粘土鉱物のコンシステンシーに及ぼす吸着イオンの影響は、松尾, White, W.A. と T.W. Lambe, Winterkorn, H.F. and Bierrum, L. 等によって研究されてきた。しかしながら、これらの研究結果では、吸着カチオンのコンシステンシーに及ぼす効果は非常に複雑である。これはそれぞれの粘土鉱物の結晶度や粒径が一定でないことに帰因するものと思われる。

参考までに表-4.9に White, W.A. の表-4.10に T.W. Lambe の実験結果を示す。

表-4.9では、モンモリロナイトの吸着イオンが Na^+ の場合非常に大きな L.L. 値を示すが、 Ca^{++} , Mg^{++} は小さくでている。また、カオリナイトとイライトはほぼ似かよった傾向を示している。表-4.10では、モンモリロナイトは $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++}$ の順で、イライトは $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++}$ の順で、カオリナイトは $\text{Mg}^{++} > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{++}$ の順で液性限界の値が小

さくなっている。2つの表から全般的な傾向として、 Na^+ を吸着したモンモリロナイトの液性限界値が異常に大きくなるのがわかる。

本研究に用いた試料は吸着イオンが過飽和の状態で存在しているので、表-4・9と比較することによって間げき水中に塩類が溶存していることによる影響を調べることができる。

表-4・9 アッターベルグ限界 (%)

粘 土 鉱 物		Na^+			Ca^{++}			Mg^{++}		
		L.L.	P.L.	P.I.	L.L.	P.L.	P.I.	L.L.	P.L.	P.I.
モンモリロナイト	①	344	93	251	166	65	101	158	59	99
	②	443	89	354	155	65	90	199	51	148
	③	700	97	603	177	63	114	162	53	109
	④	280	86	194	123	79	44	138	73	65
イ ラ イ ト	①	61	34	27	90	40	50	83	39	44
	②	59	34	25	69	36	33	71	35	36
	③	75	41	34	100	42	58	98	43	55
カオリナイト	①	52	26	26	73	36	37	60	30	30
	②	29	28	1	34	26	8	39	28	11

表-4・10 アッターベルグ限界 (%)

粘 土 鉱 物		Na^+			Ca^{++}			Mg^{++}		
		L.L.	P.L.	P.I.	L.L.	P.L.	P.I.	L.L.	P.L.	P.I.
モンモリ (C.E.C.=125)		710	54	656	510	81	429	410	60	350
イライト (C.E.C.=30)		120	53	67	100	45	55	95	46	49
カオリン (C.E.C.=7)		53	32	21	38	27	11	54	31	23

表-4・9から明らかなように、 Na 吸着モンモリロナイトは他のものと比較して液性限界の値は非常に大きい、本試験では、未処理モンモリロナイトが最も大きくでている。これは間げき水中の塩濃度が影響しているものと考えられる。ちなみに各処理の液性限界の間げき水中の塩濃度を計算してみると、 Na 処理0.76規定、 Ca 処理0.46規定、 Mg 処理0.44規定であった。モンモリロナイトの未処理は表-4・7に示したように、吸着イオンの大部分が Na^+ である。したがって、表-4・9、表-4・10の Na モンモリロナイトに相当するのが未処理モンモリロナイトと考えてよい。

表-4・11 アッターベルグ限界 (%)

試 料	処 理	L.L.	P.L.	P.I.	I.f.
モンモリロナイト	未処理	323	45	278	29.6
	Na 処理	158	47	111	27.6
	Ca 処理	130	38	92	23.3
	Mg 処理	148	43	105	29.6
カオリナイト	未処理	50	29	21	11.1
	Na 処理	52	29	23	10.6
	Ca 処理	47	27	20	11.7
	Mg 処理	49	28	21	11.8
カオリナイト + モンモリロナイト	未処理	183	36	146	18.4
	Na 処理	102	36	66	21.6
	Ca 処理	92	35	57	17.6
	Mg 処理	99	34	65	23.3

カオリナイトの場合、吸着カチオンの差異による変化はみられなかった。これはカオリナイトがモンモリロナイトと比較して粒径が大きく、比表面積の小さい不活性粘土鉱物のためである。White, W.A.によると、表-4・9に示しているように、液性限界は結晶度の程度によって異なり、結晶度のよいカオリナイトでは Na^+ が吸着していると、液性限界が減少すると言っている。

モンモリロナイトとカオリナイトを混合した場合、それぞれ単独の液性限界の平和的な値が出ている。

iii) 圧 密

各試料とも液性限界付近の含水比で圧密を初め、圧密荷重は $0.2\text{kg}/\text{cm}^2$ から $6.4\text{kg}/\text{cm}^2$ までとした。図-4・24にモンモリロナイトの $e-\log P$ 曲線を示した。

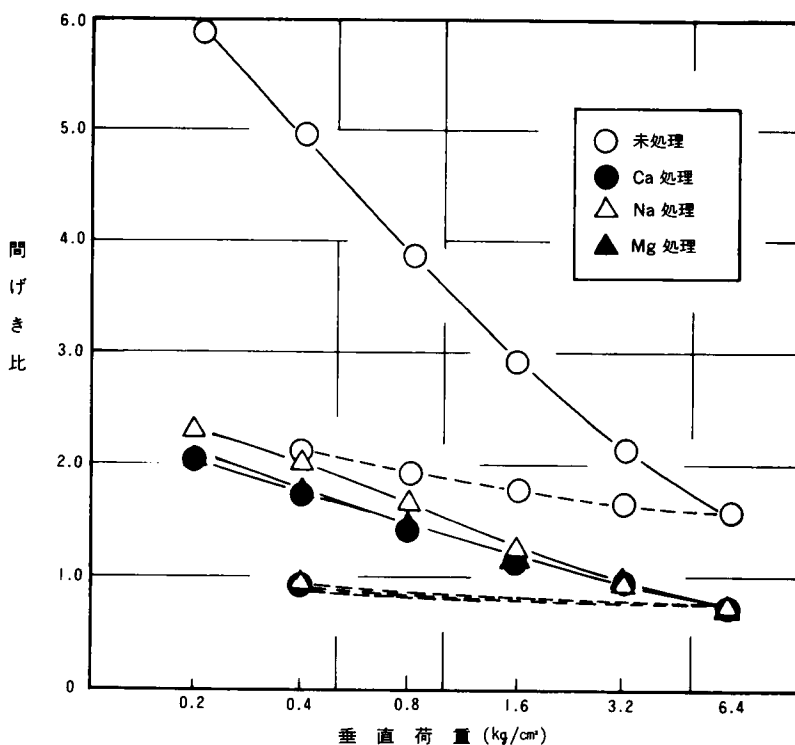


図-4・24 モンモリロナイトの圧密試験結果

未処理のモンモリロナイトとカチオン吸着試料とでは、液性限界に大きな差があるため圧密開始時の間げき比は前者が大きくなっている。未処理土の場合、間げき水として蒸留水を用いているので、反発力が大きくなり、圧密開始時には、処理土よりも間げきの大きいランダム構造を示し、圧密の進行に伴ない中間的配向へと進むため、間げき比は急速に減少する。しかし、圧密荷重が $6.4\text{kg}/\text{cm}^2$ になると、間げき水の排出により粒子間距離が短くなることによって、粒子間に作用する反発力と膨潤圧が抵抗力として作用するので、間げき比の減少率が小さな荷重の時よりも小さくなっている。カチオン吸着土は、間げき水の塩濃度が高いので、反発力も膨潤圧も未処理より低下し、最終荷重の $6.4\text{kg}/\text{cm}^2$ では各吸着土ともほぼ同じ間げき比になっている。

Ca, Mg 処理の場合、膨潤性が失われ、間げき水中の塩濃度が高いので、圧密開始時には反発力よりもけん引力の方が勝り、綿毛化構造を形成し、それが圧密されることによって、配向構造あるいはそれに近い構造に変化しているのが見られる。

図-4-25にカナリナイトの圧密試験結果を示す。カオリナイトは不活性粘土鉱物なので、モンモリロナイトのように、吸着イオンによる差異はほとんど見られなかった。しかし、カオリナイトの場合も、未処理は処理土に比べ圧密の進行に伴う間げき比の減少は急激である。

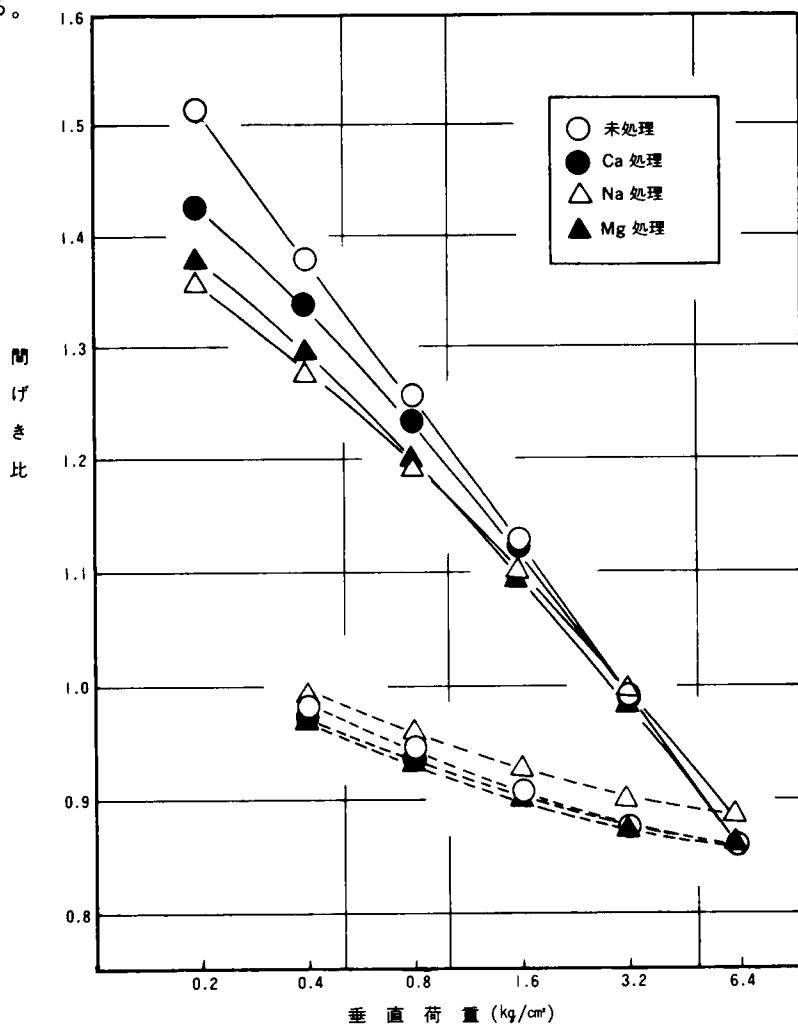


図-4-25 カオリンの圧密試験結果

モンモリロナイトとカオリナイト混合物の $e-\log P$ 曲線では、モンモリロナイトの影響するところ大で、モンモリロナイトの圧密曲線に似た形がでている。しかし、2価カチオンと Na 処理の間には有意の差がでている。これは Na イオンによって初期の構造が分散構造になったのが大きな原因と思われる。

つぎに圧密荷重と透水係数の結果を図-4-27に示す。図から明らかな様に各荷重段階とも処理土の透水係数は未処理土の約10倍程度大きい。処理土の中でも Ca 処理は最大の透水係数を示す。

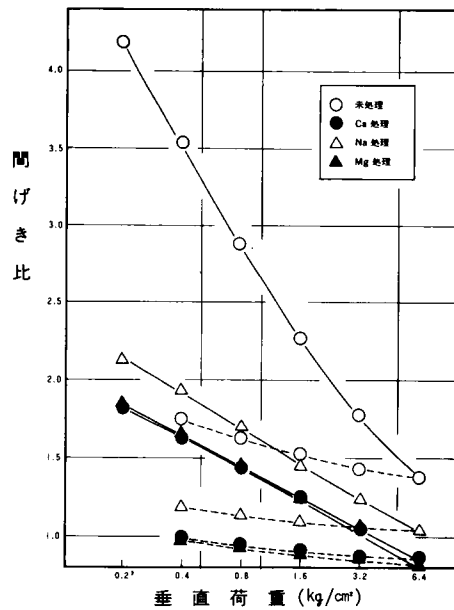


図-4-26 モンモリロナイトとカオリンの混合物の圧密試験結果

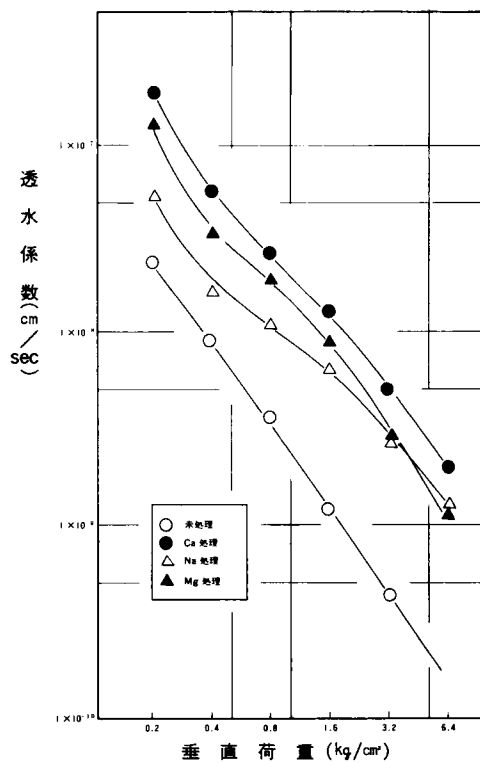


図-4-27 モンモリロナイトの透水試験結果

以上の圧密試験結果を要約すると、モンモリロナイトのような活性で膨潤性を有する粘土は各種塩類で処理する事によって著しくその圧密特性を変化させる事ができる。塩類としては Ca^{++} 、 Mg^{++} のような2価の塩類が特に有効であった。また、カオリナイトのような不活性粘土鉱物は塩を処理する事によって、その性質は大きく変わる事はない。

iv) セン断強度

急速セン断試験結果を図-4・28、図-4・29に示す。モンモリロナイトの場合、処理土は一般的に未処理土よりも大きな強度がでてゐる。カオリナイトは処理することによってわずかに大きな強度がでた。これは塩類で処理した試料において、事前圧密によって粒子の面端結合が生じ、その結合がセン断強度に大きく寄与していると考えられる。

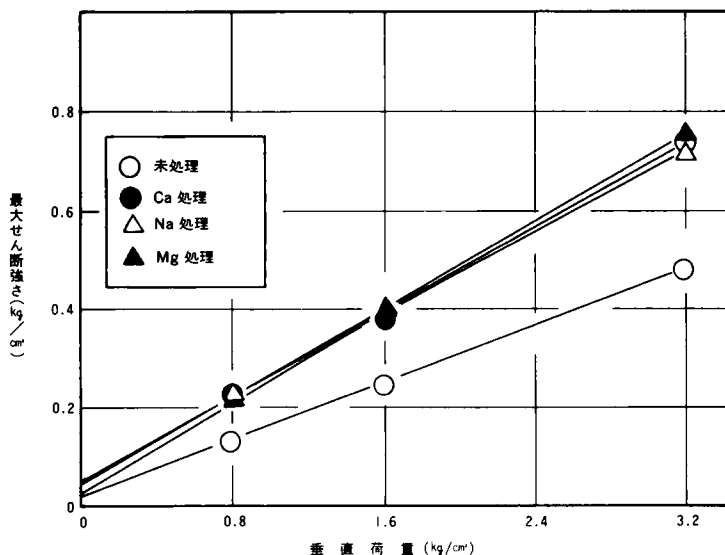


図-4・28 モンモリロナイトのせん断試験結果

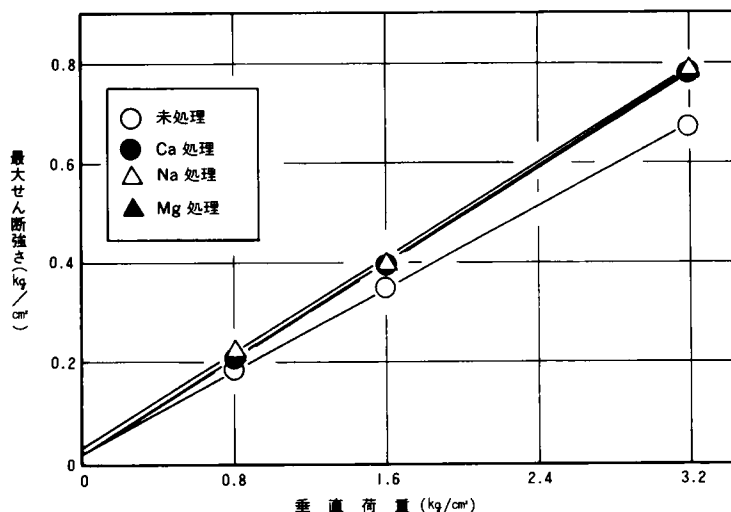


図-4・29 カオリナイトのせん断試験結果

せん断強度は粘着力成分、摩擦力成分、有効応力の変化によって決まる。一般に浸透によってせん断強度は減少する。これを土塊の軟弱化によって説明する場合、粘着力成分の減少と間げき水圧の増加を意味する。これらは付加的に土粒子間隔の増加、圧縮応力の増加をもたらす。物理化学的条件、土塊の生成条件、排水条件および荷重条件などによって支配されるせん断挙動は当然膨潤によっても影響を受ける。盛土斜面内の間げき水圧の発生は、土塊の膨潤性とその要因となるし、また岩石から風化された粘土の吸水能力は高いので、それらの粘土への自由水の供給がある場合には、軟弱層が形成され、せん断強度は減少する。したがって土質改良の立場からいえば、膨潤性によるせん断強度の減少をなくすことを考えねばならない。本研究においては、各種塩類を処理し、塩基置換を行なう事と間げき水中の塩濃度を高める事によって、活性粘土の膨潤性を抑え、せん断強度を増加させる事を示している。しかし、Na 処理土については間げきの塩濃度が低くなると膨潤が起り、強度は極端に小さくなる。この事はクイック・クレーのリーチングによる地すべり例等によって明らかである。Ca 処理、Mg 処理については、間げきの塩濃度の変化によって強度的には変化はほとんど見られなかった。

v) 突固め・一軸圧縮強度

塩類処理による突固め特性を調べ、その突固め試料を用いて、一軸圧縮強度特性を求めた。図-4・30、図-4・31に突固め曲線を示している。モンモリロナイトは塩処理することによ

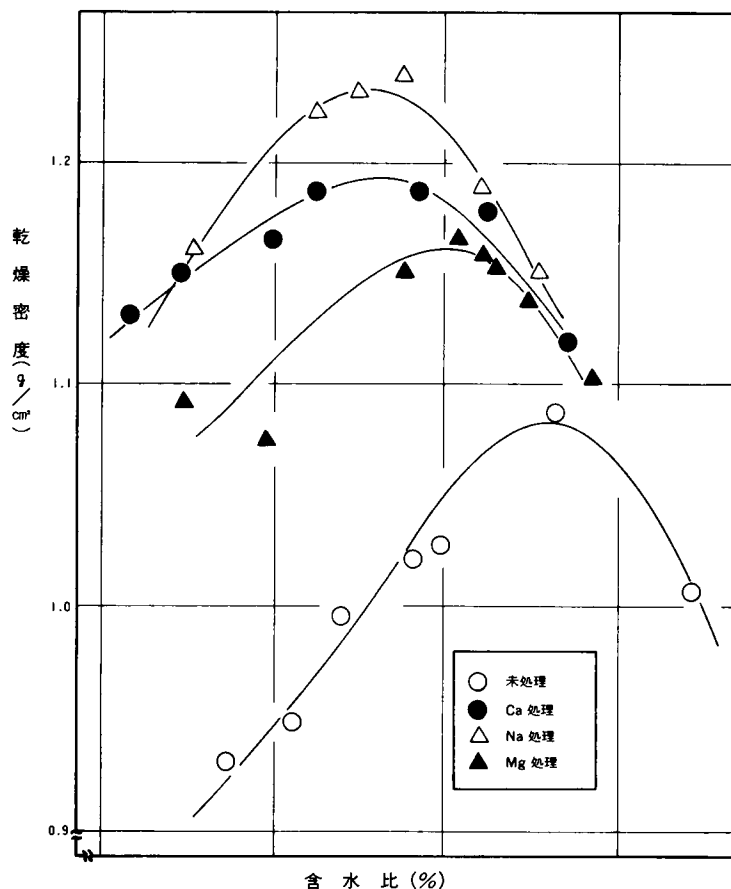


図-4・30 モンモリロナイトの突固め曲線

よって、より高い乾燥密度が得られ、最適含水比も低下する。乾燥密度は未処理< Mg 処理< Ca 処理< Na 処理の順に高くなっている。カオリナイトの場合も塩処理することによって乾燥密度は増加する。この場合は、未処理< Na 処理< Mg 処理< Ca 処理の順に高くなる。また、ここには示していないが、モンモリ+カオリンの場合も処理することによって乾燥密度は増大し、その傾向は未処理< Na 処理< Mg 処理< Ca 処理の順であった。塩処理を行なうことによる乾燥密度増加の効果は粘土鉱物によって異なるが一般に、塩基置換を行ない間げき水中の塩濃度を高めると高い乾燥密度が得られる。本実験のように間げきの塩濃度が高くなると、細粒分の多いモンモリロナイト等では粒子間の反発力よりも凝集力が大になり、単位ブロックを形成し易くなり、その為に乾燥密度が大になる。

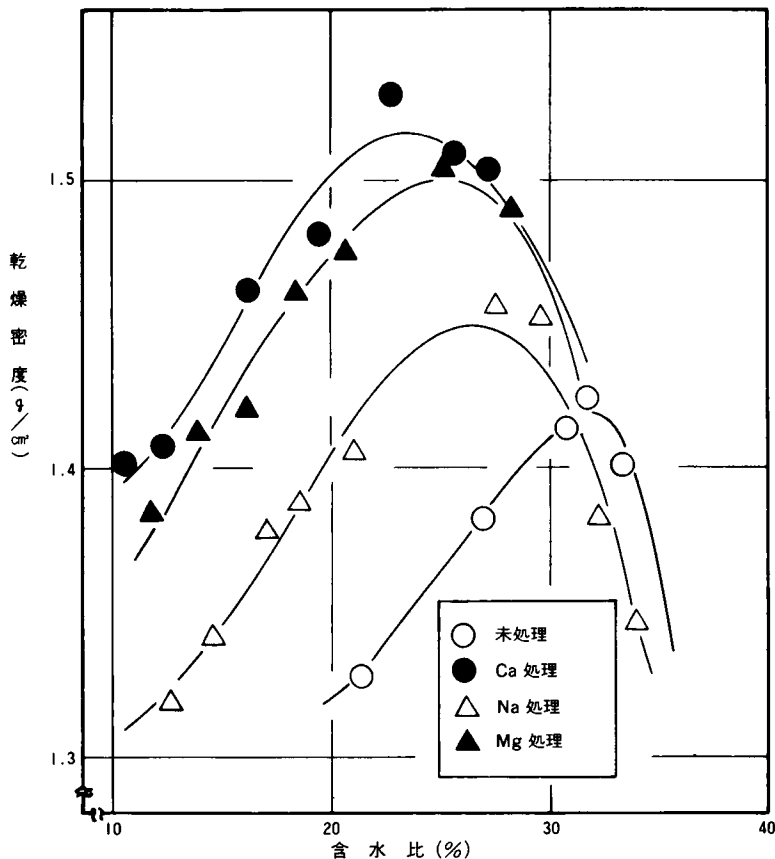


図-4-31 カオリンの突固め曲線

つぎに、突固め試料を用いて、一軸圧縮試験を行なった結果を図-4-32、図-4-33に示す。すべての試料において、最大の一軸圧縮強度は最適含水比の乾燥側にでている。モンモリロナイトの場合、塩処理によって強度は増加している。各処理の中では、Na 処理が最も高い強度をもち、Ca、Mg 処理がほぼ同じ強度特性を有している。高含水比での強度特性（図-4-28）と比較すると、各処理間の差異がはっきりしているが、塩処理による強度増大はそれほど大ではない。

カオリナイトの場合、塩処理による強度増加の傾向はみられなかった。これはカオリナイトが不活性粘土鉱物で、塩基置換の効果がうすいことに帰因する。

上述してきたように、モンモリロナイトにおいては塩処理することによって、突固め特

性，強度特性とも改良される。これは塩類による粒子間の反発力の抑制とセメンテーション効果の現われによるものと考えられる。

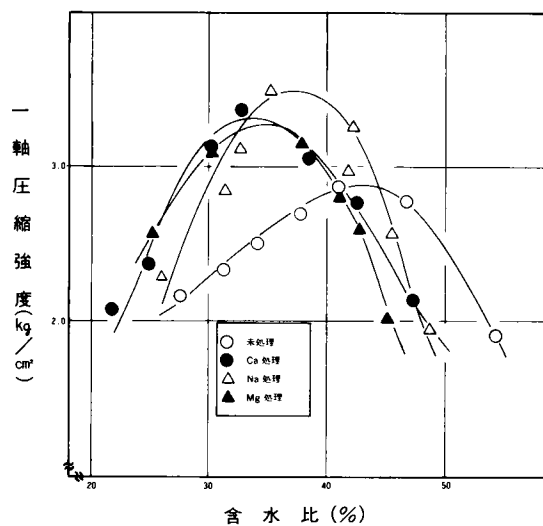


図-4・32 モンモリロナイトの一軸圧縮試験結果

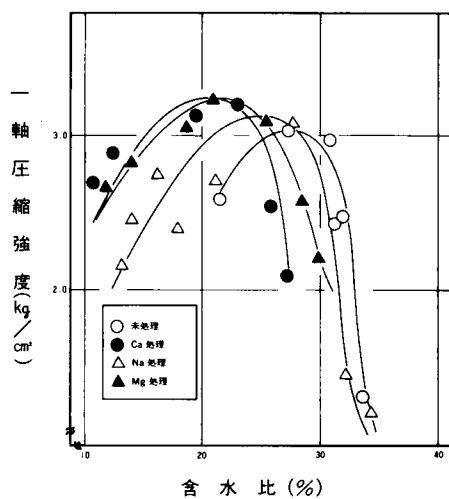


図-4・33 カオリンの一軸圧縮試験結果

4.2.3 結 語

本節でえられた結果をとりまとめると、つぎのようになる。

- (1) 吸着カチオンが変化することによって工学的特性が変化するのはモンモリロナイト系粘土鉱物のような活性粘土に限られる。
- (2) カオリナイトのような不活性粘土は含水比が比較的低いところで、処理した塩類の凝集効果による締め固め特性の改良に止まる。
- (3) モンモリロナイトの膨潤性は、間げき水が水溶液の場合、 Ca^{++} 、 Mg^{++} 等の2価カチオンが吸着している場合、抑制されるか、 Na^{+} が吸着すると増大する。しかし、間げきの塩濃度が増大し、0.5規定を越えると、吸着イオンが何であっても一定の膨潤量しか示さない。
- (4) モンモリロナイトに塩類を処理して効果が大きいのは高含水比（液性限界付近）で、特に、L.L.や圧密特性の改良効果は著しい。
- (5) 吸着イオンでは、2価のカチオンを吸着したモンモリロナイトは間げきの塩濃度が低下しても一定の改良効果を有しているが、 Na^{+} を吸着したものは塩濃度の低下により、著しく土性が悪くなる。

4.3 結 論

本章では、地すべり粘土の主要な粘土鉱物であるモンモリロナイトを安定化するため、カリウム固定法とイオン交換工法の基本的な実験結果をまとめたものである。

第1節ではモンモリロナイトのカリウム固定が、基本的にはモンモリロナイト系粘土のイライト粘土への変化であることを示し、K-固定によりX線の性質、熱的性質および塩基置換容量が変化する事を示している。さらに、工学的にもカリイオンのモンモリロナイトの層間への固定による固結・団粒化作用が土性改良の主因であることを示し、特に高含水比での改良効果は著しい。

第2節では、モンモリロナイトをNa、Ca、Mg等の塩類でイオン交換させた場合の工学的特性の変化を示した。 Ca^{++} 、 Mg^{++} を吸着したモンモリロナイトは膨潤抑制効果著しいため、有効応力の増大につながり土性改良効果につながっている。 Na^{+} を吸着したモンモリロナイトは、 Na^{+} の水和径が大で極性が大なために、結晶格子の膨潤が著しく、細粒子であるモンモリロナイトを分散構造にすることによって強度その他の性質を悪くする。しかし、 Na^{+} であっても、間げき水中の塩濃度を大にするほど処理（塩濃度が0.5規定以上）すれば、2価カチオンを処理したのと同程度の改良効果を発揮する。

＜参 考 文 献＞

- 1) 松尾新一郎監訳「風化—その理論と実態」ラティス社, p.p.93～95, 1971
- 2) 森田修二「土壌学汎論」養賢堂, p.p.320～321, 1965
- 3) Volk, N.J., "The formation of muscovite in soils and refinements in specific gravity separations of minerals," Am. J. Sci., 26, p.p.114～129, 1933.
- 4) Volk, N.J., "The fixation of potash in difficulty available in soils", Soil Sci., 37, p.p. 267～287, 1934.
- 5) Chaminade, R., and Drouineau, G., "Recherches sur la lecanique chimique des cations exchangeables," Ann. Agron. 5, p.p.677～690, 1936.
- 6) Truog, E., and J.R. Jones, "Fate of soluble potash applied to Soils", Indus. and Engin. Chem. 30, p.p.882～885, 1939.
- 7) Kolodny, L., "Potash fixation and Cation exchange capacity", Soil Sci., 39, p.p.207～215, 1936.
- 8) Page, J.B., and L.D. Bayer, "Relation of ionic size to fixation of potash and other cations by colloidal clay", Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 4, p.p.150～158, 1940.
- 9) Stanford, G. and Pierre, W.H., "The relation of potassium fixation to ammonium fixation", Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 11, p.p.155～160, 1947.
- 10) Deturk, E.E., Wood, L.K. and Bray, R.H., "Potash fixation in corn belt soils", Soil Sci., 55, p.p. 1～12, 1943.
- 11) 松尾, 富田, 「モンモリロナイト系粘土の物理化学的および工学的特性に及ぼすカリウム固定の影響」, 日本材料学会誌「材料」Vol. 26, No.290, p.p.17～22, 1977.
- 12) Wiklander, L., "Forms of potassium in the soil", Potassium Symposium, p.p.109～121, 1954.
- 13) Marshall, C.E., "Layer lattices and base exchange in clays", Ztschr. Krist., 91, p.p.433～449, 1935.
- 14) Barshad, I., "Vermiculite and its relation to biotite", Am. Mineralogist, 33, p.p.655～659, 1948.
- 15) Barshad, I., "Effect of Interlayer cations on expansion of mica lattice", Am. Mineralogist, 35, p.p.225～231, 1950.
- 16) 松尾, 嘉門, 富田, 「地すべりの物理化学的方法による予知とその対策」, 土質工学会誌「土と基礎」Vol. 28, No.265, p.p.45～52, 1980.
- 17) Helfferick, F., "Ion Exchange", McGraw-Hill, New York, 1962.
- 18) Kelley, W., P., "Cation Exchange in Soils", Reinhold, New York, 1948.
- 19) Thompson, H.S., "On the Absorbent Power of Soils", J.Roy. Agr. Soc. Eng., 11, p.p. 68～74, 1850.
- 20) Way, J.T., "On the Power of Soils to Absorb Manure", J.Roy. Agr. Soc. Eng., 11, p.p. 313～379, 1850.
- 21) Way, J.T., "On the Power of Soils to Absorb Manure", J.Roy. Agr. Soc. Eng., 13, p.p. 123～143, 1852.

- 22) Forschamer, G., "Studils on Ionic Exchange", Ann. Roy. Agr. Coll. Sweden, 14, p.p.1 ~ 171, 1946
- 23) Weiss, A., and J. Russow, "Über die dage der austawshbaren Kationen bei Kaolinit", Proc. Inters Clay Conf., Stockholm, 1, p.p.203 ~ 214, 1963
- 24) Brown, G.A., "Fourier Investigation of Montmorillonite", Clay Minerals Bull, No. 4 p.p.109 ~ 111, 1950
- 25) Walker, G.F., "The Cation Exchange Reaction in Vermiculite", Proc. Intern. Clay Conf., Stockholm, 1, p.p.177 ~ 181, 1963.
- 26) Kelley, W.P., and A.B. Cummins, "Chemieal Effect of Salts on Soils", Soil Sci. 11, pp.139—159, 1921
- 27) Gedroiz, K., "On the Absorptive Power of Soils," Translated by S. Waksman and distributed by U.S. Department of Agriculture, 1922
- 28) Jenny, H., and A.D. Ayers," The Influence of the Degree of Saturation of Soil Colloids on the Nutrient Intake by Roots", Soil Sci. 48, 443—459, 1939.
- 29) Wiegner, G., and H.Jenny, "Ueber Basenawstawsch an Permutiten," Kolloid-Z., 43, p.p.268—272, 1927
- 30) Schachtschabel, P., "Untersuchungen über die Sorption der Tonmineralien und organischen Bodenkolloide and die Bestimmung des Anteils dieser Kolloide an der Sorption in Boden", Kolloide Beihefte, 51, 199—276, 1940.

第5章 物理化学的安定工法の実施例

1), 2), 3)

5.1 生駒山地すべり安定工法

5.1.1 地すべりの概要

奈良県と大阪府の境をなしている生駒山において、昭和44年7月地すべりが発生し、移動は間けつ的に約1年続いた。その規模は幅約90m、斜面長方向に約100mと比較的小規模のものであったが、当地は約10年毎に突発的に移動を繰り返し、今回が3度目の地すべりになる。

生駒山は第三紀末に奈良盆地が地殻構造運動で生じた時に傾動地塊山脈として生まれた。山頂付近の地質学的特徴は閃緑岩と斑レイ岩の卓越した花崗岩を基岩としている。表土は主として風化岩やその風化変質の更に進んだ砂まじりの粘土からなっている。上述したように本地すべりは10年毎に発生している事から、これらの粘土の変質が重要な原因を占めているものと推察される。そこで、地すべり斜面にボーリング機械によって25個の孔を掘削し、そのうちの15孔に石灰を、8孔に塩化カルシウムを投入した。残りの4孔すなわちボーリングNo.3, 5, 6, 12は地下水を定期的に採水して効果の確認をするために用いた。また、地すべり斜面に隣接した斜面にも4つのボーリングを行なった。このボーリング孔からの試料はボーリングNo.B-1, B-2, B-3, B-4であり、地すべり斜面からのボーリング試料は、No.1, 10, 21で示している。表-5・1～表-5・9はこれらのボーリングから得られた試料の概略を示している(図-5・1参照)。

表-5・1 ボーリング No.A-1

試料No.	深 さ(m)	分 類	色
1	1.0～1.3	砂混り粘土	暗かっ色
2	5.0～5.3	砂混り粘土	黄 土 色
3	11.0～11.3	砂混り粘土	暗 黄 色
4	17.0～17.3	砂混り粘土	灰かっ色
5	20.0～20.2	砂混り粘土	黄 土 色
6	21.0～21.6	砂混り粘土	明 黄 色
7	24.0～24.8	砂混り粘土	明 黄 色

表-5・2 ボーリング No.A-2

試料No.	深 さ(m)	分 類	色
1	0.0～0.3	砂混り粘土	黄カッ色
2	1.15～1.45	砂混り粘土	黄カッ色
3	3.15～3.45	砂混り粘土	黄カッ色
4	5.7～6.8	礫	暗 灰 色
5	10.15～10.45	砂混り粘土	黄カッ色
6	11.2～11.7	礫	暗 灰 色
7	13.15～13.4	砂混り粘土	灰 色
8	14.0～14.6	礫	暗 灰 色
9	16.2～16.5	砂混り粘土	灰カッ色
10	19.2～19.5	砂混り粘土	黄カッ色

表-5・3 ボーリング No.1

試料No.	深 さ(m)	分 類	色
1	0.0～1.0	砂質シルト	暗カッ色
2	1.0～2.0	砂質シルト	暗カッ色
3	2.0～3.0	砂質シルト	黄カッ色
4	3.0～4.0	砂混り粘土	カ ッ 色
5	4.0～5.0	砂混り粘土	黄カッ色
6	5.0～6.0	砂混り粘土	黄カッ色
7	6.0～7.0	砂混り粘土	黄カッ色

表-5・4 ボーリング No.10

試料No.	深 さ(m)	分 類	色
1	0.0～ 1.0	砂質シルト	黄カッ色
2	1.0～ 2.0	砂質シルト	黄カッ色
3	2.0～ 3.0	砂混り粘土	黄カッ色
4	3.0～ 4.0	砂混り粘土	明 黄 色
5	4.0～ 5.0	砂混り粘土	明 灰 色
6	5.0～ 6.0	砂混り粘土	明 黄 色
7	6.0～ 7.0	砂混り粘土	暗 黄 色
8	7.0～ 8.0	砂混り粘土	明 灰 色
9	8.0～ 9.0	砂混り粘土	明 黄 色
10	9.0～10.0	礫	暗青灰色

表-5・5 ボーリング No.21

試料No.	深 さ(m)	分 類	色
1	1.0～ 2.0	砂混り粘土	明 黄 色
2	2.0～ 3.0	砂混シルト	黄カッ色
3	3.0～ 4.0	砂質シルト	黄カッ色
4	4.0～ 5.0	砂質シルト	明カッ色
5	5.0～ 6.0	砂質シルト	明 黄 色
6	6.0～ 7.0	砂混り粘土	暗 灰 色
7	7.0～ 8.0	砂混り粘土	暗 灰 色
8	8.0～ 9.0	砂混り粘土	明 黄 色
9	9.0～10.0	砂混り粘土	明 黄 色
10	10.0～11.0	砂混り粘土	暗 灰 色
11	11.5～12.5	礫	暗黄灰色
12	12.0～13.0	砂混り粘土	明 黄 色
13	13.0～14.0	砂混り粘土	明 黄 色
14	14.0～15.0	砂混り粘土	明 灰 色

表-5・6 ボーリング No.B-1

試料No.	深 さ(m)	分 類	色
1	1.15～ 1.45	砂混り粘土	暗 黄 色
2	2.0 ～ 2.9	礫	青 灰 色
3	4.15～ 4.45	砂混り粘土	暗 黄 色
4	5.5 ～ 6.5	礫	青 灰 色
5	8.15～ 8.45	砂混り粘土	暗 黄 色
6	11.15～11.45	砂混り粘土	明 黄 色
7	12.0 ～12.4	礫	暗青灰色
8	13.15～13.45	砂混り粘土	暗 黄 色
9	15.15～15.45	砂混り粘土	暗 黄 色
10	16.0 ～18.0	礫	暗緑灰色

表-5・7 ボーリング No.B-2

試料No.	深 さ(m)	分 類	色
1	1.0 ～ 1.5	礫	暗青灰色
2	2.15～ 2.45	砂混り粘土	暗 灰 色
3	4.16～ 4.45	砂混り粘土	暗カッ色
4	4.5 ～ 6.6	礫	暗青灰色
5	6.15～ 6.45	砂混り粘土	灰カッ色
6	6.5 ～ 9.0	礫	暗青灰色
7	9.15～ 9.45	砂混り粘土	暗カッ色
8	11.0 ～12.0	礫	暗青灰色
9	13.15～13.45	砂混り粘土	暗 黄 色
10	13.7 ～15.0	礫	暗青灰色
11	15.15～15.45	砂混り粘土	暗カッ色
12	17.15～17.45	砂混り粘土	暗カッ色
13	17.5 ～20.0	礫	暗青灰色

表-5・8 ボーリング No.B-3

試料No.	深 さ(m)	分 類	色
1	0.0 ～ 1.0	砂混り粘土	暗 黄 色
2	1.0 ～ 1.6	礫	暗青灰色
3	3.15～ 3.45	砂混り粘土	暗カッ色
4	4.15～ 4.45	砂混り粘土	暗カッ色
5	9.15～ 9.45	砂混り粘土	暗カッ色
6	10.0 ～14.2	礫	暗青灰色
7	15.15～15.45	砂混り粘土	暗カッ色
8	17.0 ～17.5	礫	暗青灰色
9	19.0 ～19.3	砂混り粘土	暗カッ色

表-5・9 ボーリング No.B-4

試料No.	深 さ(m)	分 類	色
1	2.15～ 2.45	砂混り粘土	明 黄 色
2	4.15～ 4.45	砂混り粘土	黄カッ色
3	6.15～ 6.45	砂混り粘土	明 灰 色
4	8.15～ 8.45	砂混り粘土	明 灰 色
5	10.15～10.45	砂混り粘土	明 黄 色
6	12.15～12.45	砂混り粘土	暗カッ色
7	15.15～15.25	砂混り粘土	暗 灰 色
8	16.15～16.45	砂混り粘土	灰 色
9	18.15～18.45	砂混り粘土	灰 色
10	20.15～20.45	砂混り粘土	灰 色

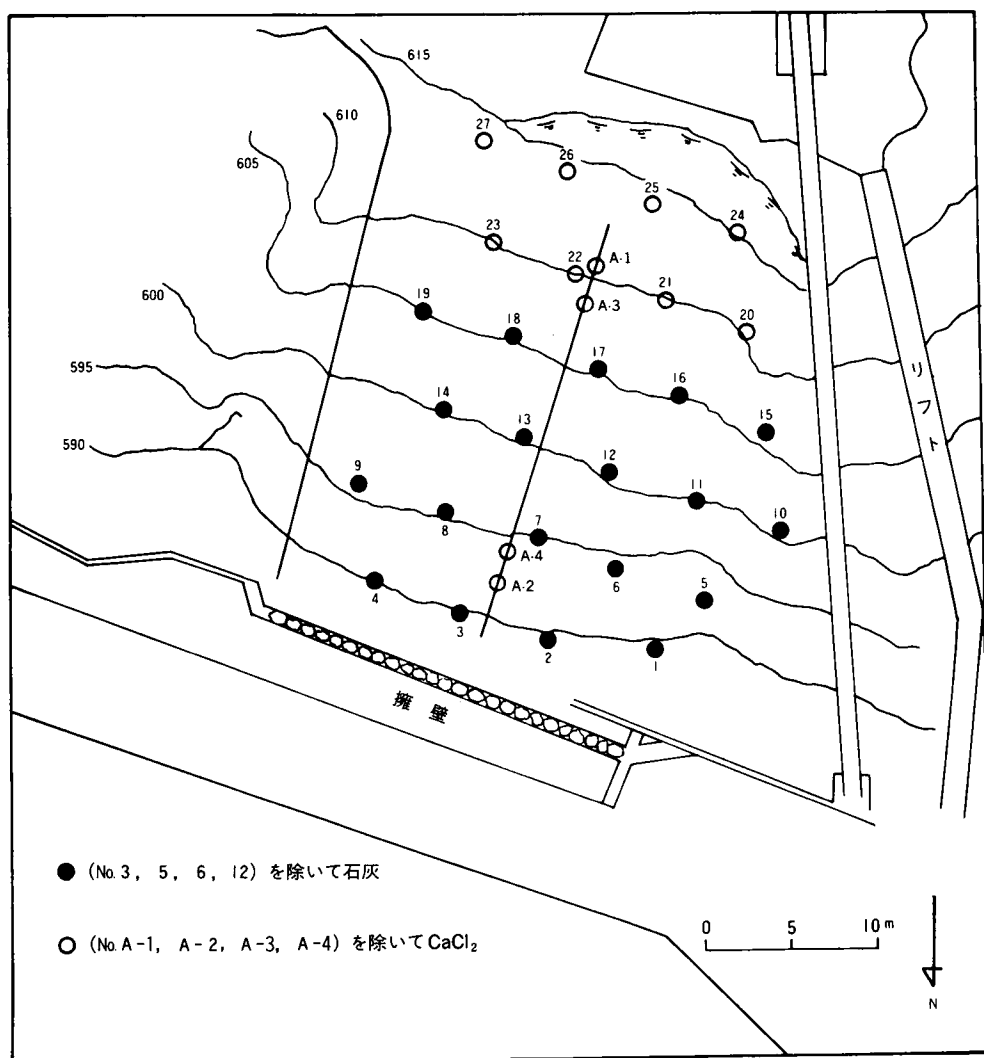


図-5.1 地すべり地平面図

5.1.2 斜面構成土の吸着イオン特性

3章で記したような方法で本斜面構成土の塩基置換容量とC.E.C.に対する吸着CaとNaの構成比を表-5.10と表-5.11に示している。これを見ると、ボーリングNo.B-1, B-3, B-4は、ボーリングNo.1, 10, 21, A-1等に比較してC.E.C.は大である。これはX線回析によって明らかになったが、前者は活性度の高い粘土鉱物であるイライト、モンモリロナイトが主たる構成鉱物であり、後者はカオリナイトが主要構成鉱物になっている。従って塩基置換容量を測定すると、土に含まれる粘土鉱物の種類と量に対する良好な指数となる事がわかる。

表-5・10 塩基置換容量と吸着カチオン

Boring No.1				Boring No.10			
No.	CEC(m.e.q./100g)Na%Ca%			No.	CEC(m.e.q./100g)Na%Ca%		
1	5.98	2.9	15.6	1	4.99	2.5	31.9
2	2.92	10.7	38.0	2	6.50	1.6	24.5
3	8.61	5.6	24.5	3	7.98	1.5	43.8
4	7.06	17.4	22.6	4	12.85	1.0	90.9
5	8.09	2.1	66.4	5	9.68	2.1	78.2
6	8.11	4.4	50.6	6	5.61	4.5	45.0
7	7.56	3.6	60.4	7	14.13	2.2	97.4
				8	3.1	8.8	84.0
				9	3.29	9.0	82.6
Boring No.21				Boring No. A-1			
No.	CEC(m.e.q./100g)Na%Ca%			No.	CEC(m.e.q./100g)Na%Ca%		
1	4.50	2.8	10.9	1	5.51	1.7	21.0
2	5.86	4.6	17.6	2	9.03	2.9	19.3
3	5.34	3.7	11.9	3	8.83	3.8	40.2
4	4.69	3.6	11.0	4	8.91	5.0	50.3
5	5.59	6.3	46.3	5	11.38	3.3	56.6
6	9.61	2.6	45.2	6	11.73	3.2	44.6
7	12.95	8.9	43.5	7	7.93	5.2	44.5
8	6.84	7.3	26.8				
9	6.46	4.7	29.1				
10	6.11	4.8	23.3				
11	6.39	3.6	33.4				
12	6.94	9.0	38.4				
13	6.66	3.0	41.5				
14	8.08	2.2	41.0				

表-5・11 塩基置換容量と吸着カチオン

Boring No. B-1				Boring No. B-2			
No.	CEC(m.e.q./100g)Na%Ca%			No.	CEC(m.e.q./100g)Na%Ca%		
1	13.08	0.6	33.7	2	8.28	1.2	25.0
3	17.60	3.1	43.4	3	4.99	6.8	36.7
5	28.54	0.1	16.1	5	8.63	5.6	61.8
6	27.88	2.3	38.5	7	11.58	2.9	90.0
8	11.64	1.9	72.1	9	12.33	1.2	82.7
9	13.12	2.9	63.2	11	13.00	3.1	72.5
				12	15.17	2.2	88.7
Boring No. B-3				Boring No. B-4			
No.	CEC(m.e.q./100g)Na%Ca%			No.	CEC(m.e.q./100g)Na%Ca%		
1	9.58	0.3	89.3	1	12.38	2.9	60.5
3	12.24	0.4	79.7	2	9.98	2.3	59.6
4	11.45	0.5	89.7	3	23.45	0.8	93.0
5	8.70	0.4	83.7	4	10.73	1.6	60.7
8	18.89	0.7	92.9	5	13.60	3.3	73.2
10	19.69	0.3	69.6	6	11.28	2.9	82.4
				7	12.15	2.1	70.3
				8	11.58	4.2	51.5
				9	11.90	4.0	55.5
				10	12.72	4.7	54.9

5.1.3 斜面構成土のコンシステンシー

粘性土においては、コンシステンシー限界がその工学的特性の良好な指数となる。そこで、ボーリングNo.1, 10, 21, A-1, B-1, B-2およびB-3から得られた試料で液性限界と塑性限界を測定した。図-5・2に、ボーリングNo.1, 10および21の深さ方向の液性限界と塑性指数を示している。また、ボーリングNo. B-1, B-2およびB-3はN値と液性限界を図-5・3に示した。この2つの図から、図-5・2では液性限界が45～60%、図-5・3では50～70%の間にある。この差異は、それぞれのボーリング試料におけるモンモリロナイトの含有量の差に基づくものである。

さらに、液性限界と土のC.E.C.に占めるCaイオン量の相関関係を図-5・4、図-5・5に示した。図-5・5においては、Caイオンは液性限界の減少に寄与している。一方、図-5・4で

は、必ずしも液性限界の減少に寄与せず、特にボーリングNo.21では逆の結果が見られる。
これは、主要粘土鉱物がカオリナイトであることに起因している。

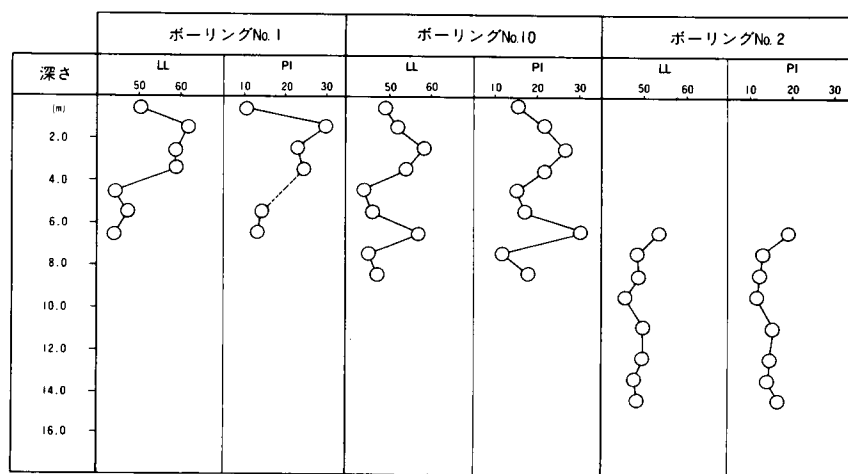


図-5-2 コンシステンシー限界 (%)

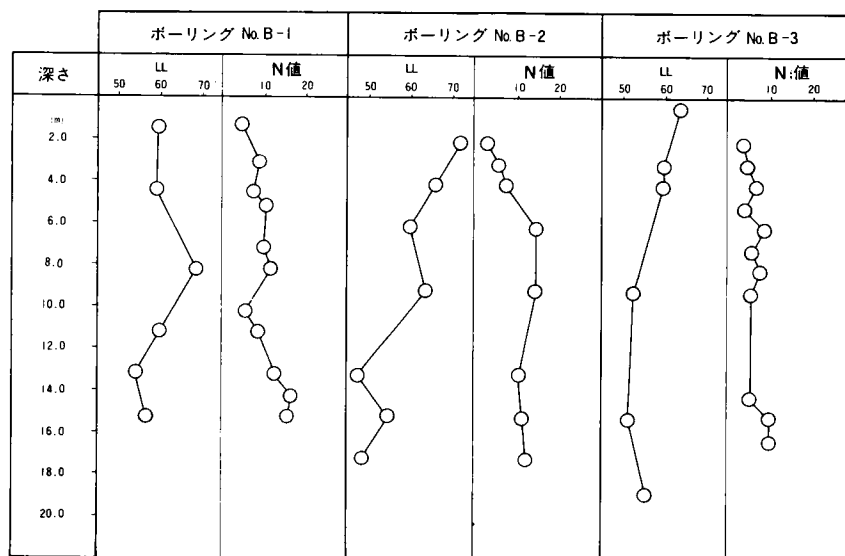


図-5-3 N値と液性限界の関係

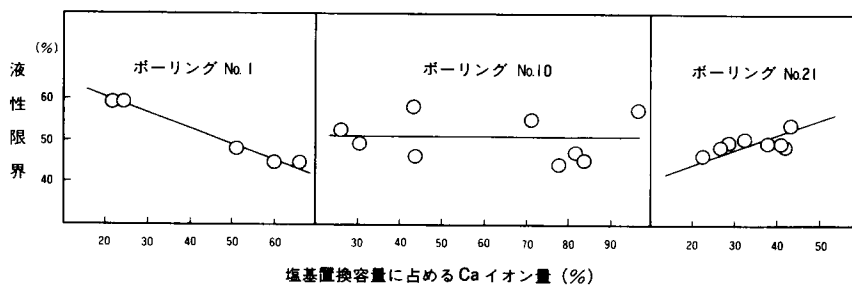


図-5-4 塩基置換容量に占めるCaイオン量と液性限界

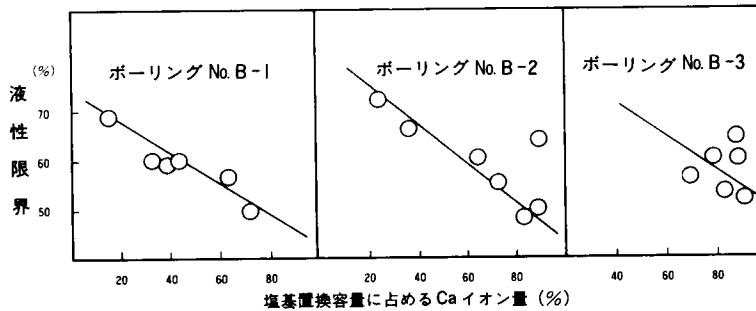


図-5.5 塩基置換容量に占めるCaイオン量と液性限界

5.1.4 施工後の効果の確認

(1) 地下水の調査

地すべりにおいては地下水の重要度について強調してもし過ぎる事はない。それは単に過剰間げき水压を及ぼすだけでなく、膨潤性粘土に対する揚圧力や、地下水中の溶存成分による土の弱体化等、種々の影響を及ぼす。

ここでは、安定化工法の効果の確認を行なうために、4本の観測井を設けた。観測井では地下水位の観察と、採水試料中の溶存カチオン (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+) の測定を行なった。表-5.12は地下水の標高、PH および溶存カチオンを示している。なお、地下水位等高線図を図-5.6に示した。表から明らかなように塩化カルシウムが地下水中に溶け始めているのがみられる。例えば、ボーリングNo.5においては、80日間で、 $0.056 \text{ meq./}\ell$ から $0.756 \text{ meq./}\ell$ に増大し、他の Na^+ , Mg^{++} は漸減する傾向にある。この事実は他の3孔、すなわち、ボーリングNo.3, 6, 12に共通している。しかしながら、これら斜面下部の観測井中の溶存Caは量的には降雨水中の量の約10倍に過ぎないことから、下部斜面に施工した石灰の不溶性と上部の塩化カルシウムがまだ十分斜面全体に行きわたっていない事を示している。

ボーリングNo.22とNo.24では異常に高いCa濃度が検出されているが、これは塩化カルシウムを投入した孔なので、残留 Ca^{++} 量を示しているものと考えられる。

表-5.12 地下水位と地下水中の溶存成分

Boring No.	DATE	WH (m)	pH	Ca meq/ℓ	Mg meq/ℓ	Na meq/ℓ
3	25. 8.1969		7.28	0.055	0.069	0.252
12	25. 8.1969		6.58	0.134	0.352	0.494
5	28.10.1969	581.8	6.52	0.056	0.133	0.418
6	28.10.1969	589.3	6.41	0.055	0.658	0.400
22	28.10.1969	606.3	7.00	2.530	2.163	0.320
24	28.10.1969	609.7	6.70	538.9	6.003	126.1
3	3.12.1969		6.83	0.062	0.062	0.139
12	3.12.1969		6.72	0.149	0.189	0.239
5	19. 1.1970	582.2	7.12	0.756	0.189	0.133
6	19. 1.1970	583.0	7.20	0.133	0.010	0.127

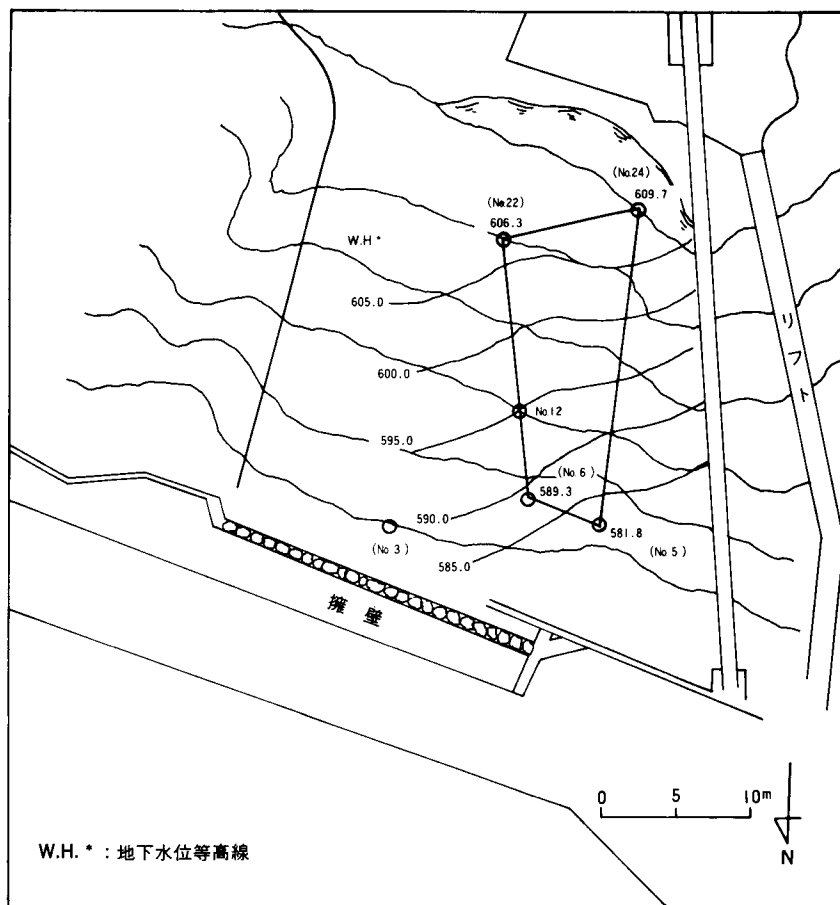


図-5.6 地下水位等高線

(2) イオン交換能力の測定

イオン交換工法としては、斜面の上部に塩化カルシウム、斜面下部に石灰を杭状に施工した。これは、塩化カルシウムが水溶性であることと、石灰のクイ効果を併せもたせるためであった。そこで、現地のイオン交換の状態を把握するために、一種の透水試験を行なった。

現地から採取した試料をハーバード締固め試験器のモールドに、自然含水比の状態(25%)で締固めた後、飽和させ、定水位透水試験を行なった。採取した土の粒度分布を図-5.7に示す。74 μ 以下の土の塩基置換容量は4.5 m.e.q./100 gで、C.E.C.に対するCa⁺⁺濃度は52%であった。

透水試験は最初、蒸留水を72時間通してから、0.1 Nの塩化カルシウム溶液を流した。

そして、蒸溜水と塩化カルシウムの両方の透水係数を測定した。また、塩化カルシウムについては、48時間、96時間および192時間通水後、吸着カチオン量と塩基置換容量の測定を行なった。

透水係数の測定結果を図-5・8に示す。図には間げき比の変化に対応する蒸溜水と塩化カルシウムの透水係数値をプロットしている。図から明らかなように、塩化カルシウムの透水係数は蒸溜水によるものよりも若干大である。塩化カルシウム溶液による透水係数の増大は土粒子界面の電気二重層により説明できる。すなわち、溶液中の電解濃度が高くなると、二重層が縮小する結果、溶液の通過する間げきが大きくなり、透水性が改良されることになる。

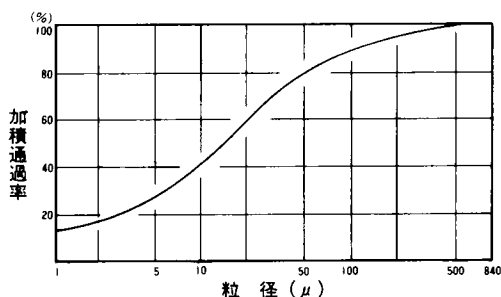


図-5-7 使用土の粒度分布

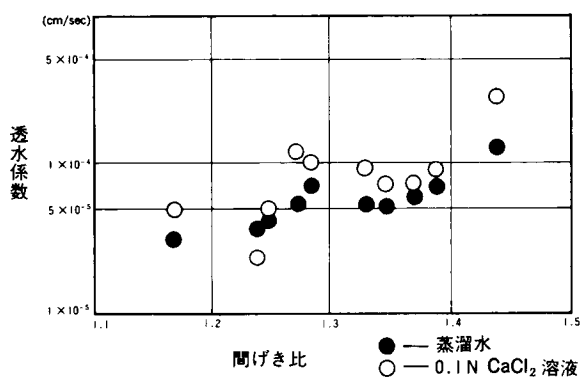


図-5-8 透水試験結果

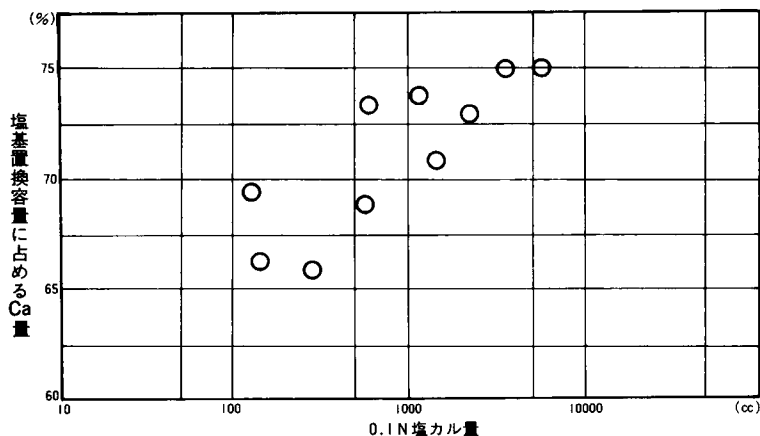


図-5-9 Caイオン濃度の比と塩基置換容量に占めるCa量

塩化カルシウム溶液通水後のC.E.C.に対するCaイオン濃度の比を図-5・9に示している。Caイオン濃度比の初期値からみると、塩化カルシウムの通水の影響がすぐに出ており、塩基置換は比較的速に行なわれるものと思われる。

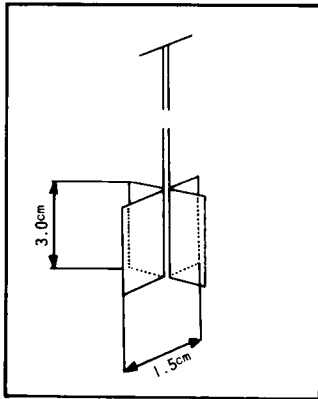


図-5・10 ペーン試験器

更に、透水試験後、吸着カルシウムイオンの強度に及ぼす影響を調べるためにペーンせん断試験を行なった。試作したペーンせん断試験器を図-5・10に示している。

図-5・11はC.E.C.に対するCaイオン吸着量比の強度に及ぼす影響を示している。図からも明らかなように、Caイオン量が増えるほど強度が増大する傾向がみられる。要約すると、交換能力の約10% Ca量が増えると強度は1 kg/cm²大になる。このことからみて、斜面上部に塩化カルシウムを処理したことによって、地すべりの安定化に効果のあった事は明らかである。

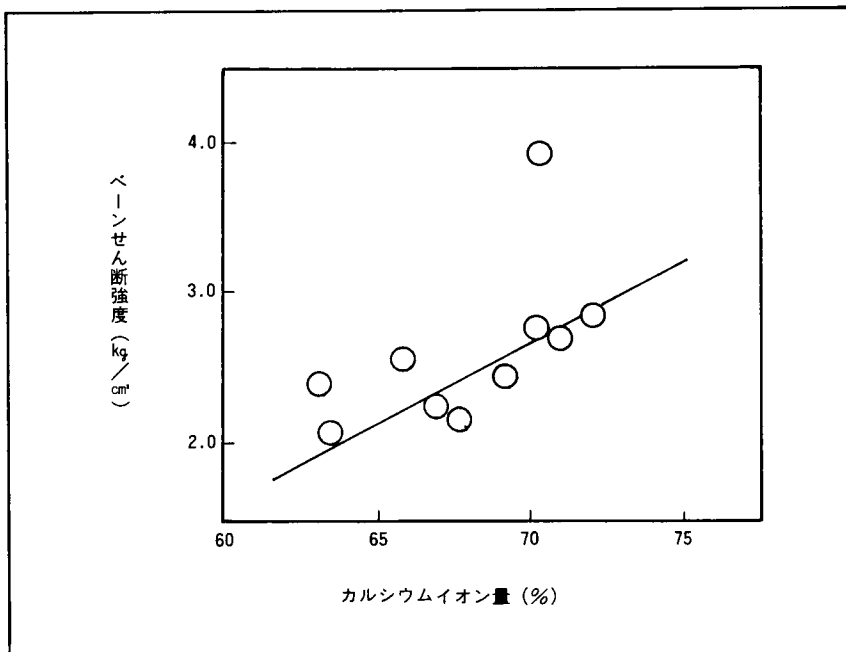


図-5・11 Caイオンと強度の関係

(3) 石灰安定処理効果の追跡

(i) X線回析パターンの変化

石灰安定処理効果の確認のために、地すべり発生後6ヶ月、安定処理後5ヶ月後の昭和45年1月末に現地で、ボーリングNo.A-3、No.A-4の2孔を掘削し、実験室へ持ち帰った(図-5・12参照)。これらの試料について石灰と周辺土の反応生成物を確めるため、X線回析、C.E.C.および吸着カチオンの測定を行なった。

石灰安定処理効果については広く研究されており、反応特性として次の項目が挙げられる。

1. 粘土の団粒化，結果として土の有効径の増大。
2. 炭酸化すなわち，空気中の炭酸ガスと石灰の反応による炭酸カルシウムの生成，これは土粒子間にセメンテーション作用を及ぼす。
3. 土粒子を結合させるポゾラン反応。
4. 塩基置換，処理前に吸着していたナトリウム，マグネシウムおよびカリイオンのカルシウムイオンによる交換反応。

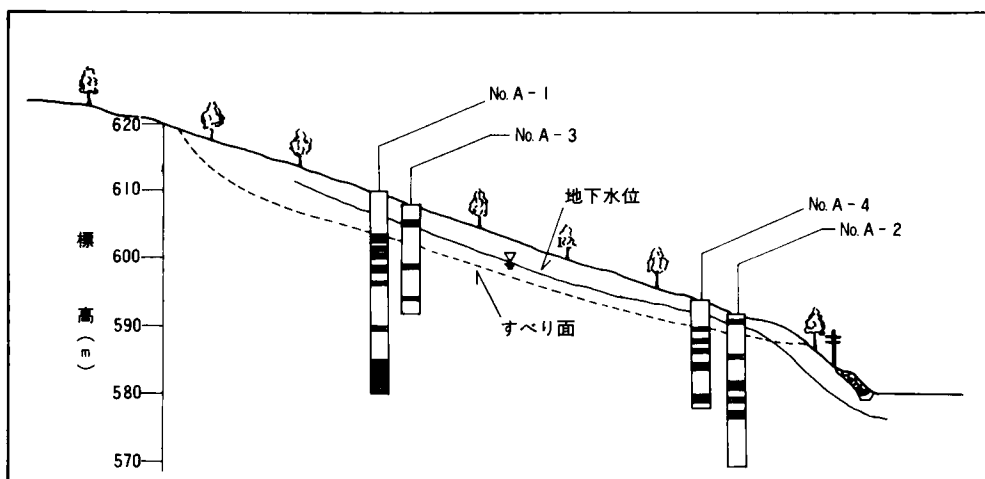


図-5-12 地すべり地断面図

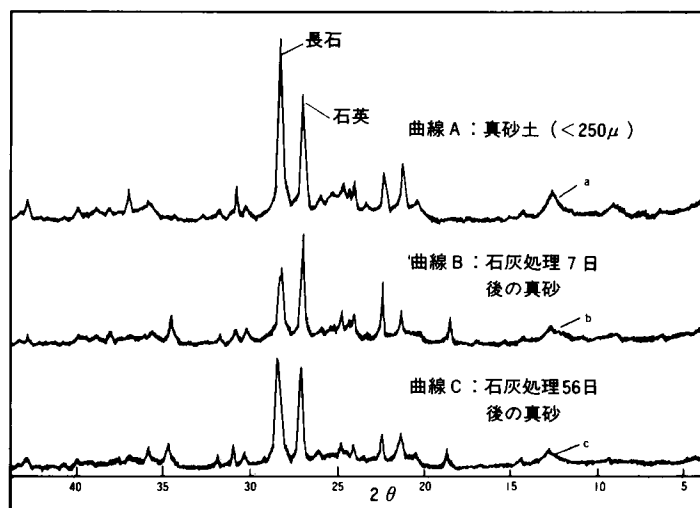


図-5-13 石灰処理による反応生成物

X線解析は，石灰と土の反応機構すなわち炭酸化，ポゾラン反応および団粒化を解明するのに最も適した方法である。図-5-13は，現地採取土に石灰を添加し7日後と56日後のX線解析結果を示している。図中の(A)曲線では石灰によるピークである $2\theta=18.1^\circ$ と $2\theta=34.5^\circ$ は認められないが，曲線(B)，(C)では明らかに存在する。

更に(B)，(C)曲線では炭酸カルシウムの $2\theta=23.5^\circ$ と $2\theta=30^\circ$ のピークが見られる。曲線(A)の $2\theta=12.5^\circ$ のピークはカオリナイトによるピークであるが，養生日数と共に $a \rightarrow b \rightarrow c$ の順に小さくなる。同様に， $2\theta=9.3^\circ$ のイライトのピークも56日後には消失している。この事実は粘土の団粒化による有効径の増大を意味することになる。

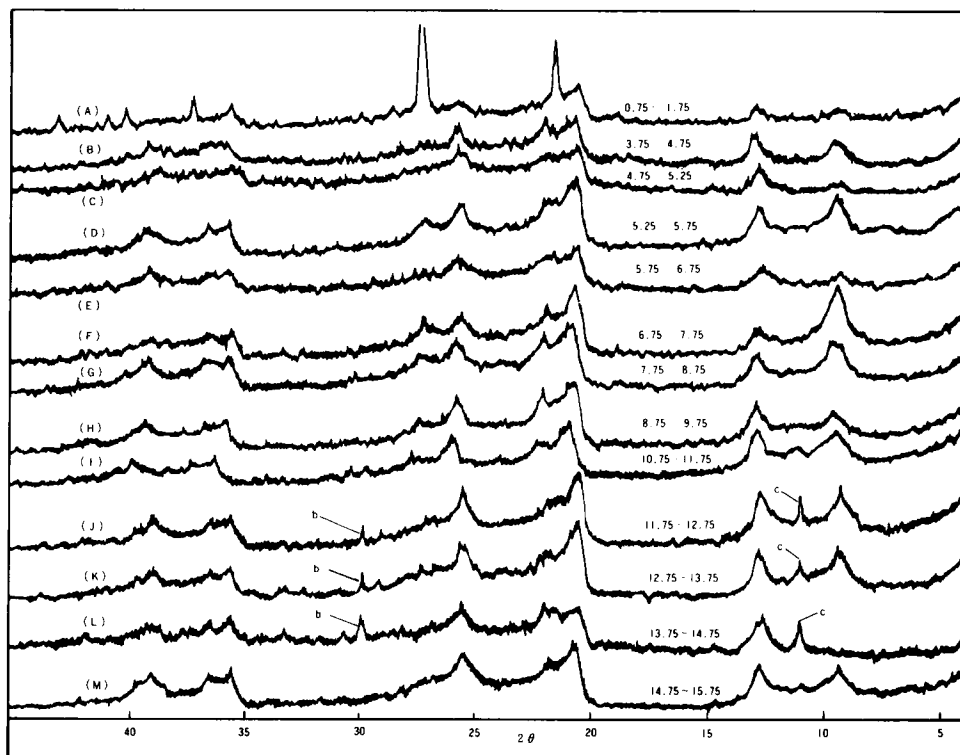


図-5-14 石灰処理後のX線回析結果（ボーリングNo A-3）

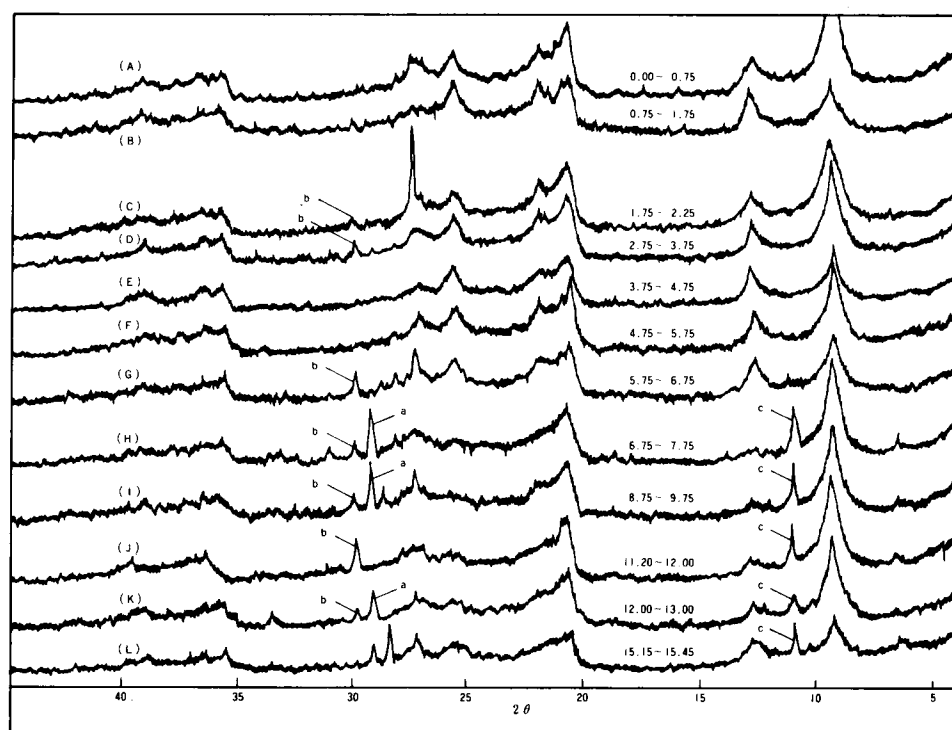


図-5-15 石灰処理後のX線回析結果（ボーリングNo A-4）

図-5・14と図-5・15はそれぞれボーリングNo.A-3とNo.A-4のX線解析結果を示している。図中に、生石灰による $2\theta=37.4^\circ$ のピークが認められ、この生石灰は水により発熱・膨張作用の後、速かに消石灰に変質する。図-5・14では、(J), (K), (L)曲線に、図-5・15では(C), (D), (G), (H), (I), (K)曲線に炭酸カルシウムによる $2\theta=30^\circ$ のピークが見られる(図中に「b」と示している)。図-5・14で「a」と示しているピークは珪酸カルシウム水和物($n\text{CaSiO}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$)を示し、粘土と石灰の反応生成物である。また $2\theta=11.2^\circ$ に現われているピークはカルシウム・アルミナ水和物($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)を示している。(図中では「c」になっている)。

上記の結果から、石灰と周辺土の反応が順調に進行しており、時間の経過と共に強度の増大が期待できる。

(ii) 吸着カチオン組成の変化

塩化カルシウムを用いた土質安定の原理は粘性土の吸着イオンを交換させることにある。従って、本工法では、斜面全体の土のイオン交換を速に行なわしめる為に、斜面上部のボーリング孔に塩化カルシウムを投入した。イオン交換の進行を測定するために、現地採取土の塩基置換容量と吸着カチオンを計測した。その結果を表-5・13に示す。

表-5・13 塩基置換容量 (m.e.q./100g) と吸着カチオン (%)

Boring No. A-3				Boring No. A-4			
No.	CEC	Na	Ca	No.	CEC	Na	Ca
1	6.61	2.3	11.6	1	9.38	8.3	27.9
2	5.61	5.3	52.2	2	8.63	6.7	39.4
3	6.19	3.6	55.9	3	9.23	8.9	34.6
4	5.36	7.3	42.9	4	9.08	8.4	33.9
5	7.58	14.9	55.7	5	8.11	6.1	48.0
6	7.68	9.0	31.3	6	8.41	8.1	47.1
7	7.16	7.6	31.4	7	6.26	3.9	20.8
8	8.98	7.8	31.4	8	9.73	11.7	47.1
10	9.13	7.0	57.6	9	10.35	10.7	44.0
11	8.73	10.8	56.2	11	10.83	7.5	39.7
12	7.93	11.8	42.0	12	11.05	7.5	51.3
14	9.43	5.9	92.1	14	12.03	3.0	60.0
15	11.65	6.1	51.1				

ボーリングNo.A-3は、図-5・1から明らかな様に、ボーリングNo.22とA-1に非常に近いので、吸着カルシウム量が大になっている。表-5・10に、ボーリングNo.A-3に近い点のボーリングNo.21とNo.A-1の処理前の吸着カチオンを示しているが、これに比べて、30~40%吸着カルシウム量が増えている。ボーリングNo.A-3とA-4の処理後のC.E.C.に対する Ca^{++} 量の平均は約44.2%、一方、処理前のボーリングNo.1, 10, 21, A-1の全ての試料の平均は39.8%である。従って、塩化カルシウム処理後150日で、全地すべり構成土の Ca^{++} 濃度がわずか5%程度増大したに過ぎない。これは前に述べたように、地下水の流動速度が非常に小さい事に起因している。しかし、イオン交換は斜面全体にわたって、徐々に進行している事から、時間の経過に伴って、斜面の安定度が更に増すものと考えられる。

5.1.5 ま と め

本研究の対象とした生駒山の地すべり地は粘土鉱物として、多量のカオリナイトと若干のイライト及びモンモリロナイトが同定された。カオリナイトはモンモリロナイトに比べて非活性の粘土鉱物であるが、その量の多い事から、斜面の安定度から見れば、不都合である。また、土の吸着カルシウムイオンが増大すると強度が増大するが、逆にNaイオンが増えると強度が小さくなる傾向がある。そこで、斜面構成土の強度を全体的に大にするために、イオン交換工法を施工した。施工後約150日終了後、効果の確認のため、地下水中の溶存イオン、斜面構成土のX線解析および吸着イオン組成の測定を実施したが、それぞ

れ、順調に改良効果が表われており、長期的に更に斜面の安定度の増大が期待できる事が判明した。

本論文作成の現時点で、地すべり発生後12年経過しているが、過去10年毎に3度も地すべりの洗札を受けた当斜面は完全に安定しており、イオン交換工法の成功を示すものと考えられる。

5.2 三田地すべり安定工法

5.2.1 地すべり地の概要^{6), 7)}

兵庫県三田市の地すべり指定地域で、中国自動車道の路線が設置される計画となり、以前すべった斜面の反対側斜面から谷にわたって、高盛土が施行されることになった。当地域の地層は神戸層群吉川累層で、岩相は泥岩、砂岩、含礫砂岩、凝灰岩等からなり、これらの地層が互相をなし、断層又は緩い褶曲構造により、同一層が繰り返し、露出している。この岩層中の泥岩は厚さ1～6mあり、白灰色～淡灰色を呈し、モンモリロナイト系の粘土質のものと、非常に硅化された硬質のものがある。前者は含水すると著しく膨潤し、地すべりの原因となり易いものであった。

上記のような地質で、過去に地すべりを起した事から当然地すべりの再発が予想された。そこで物理化学的な調査を行ない、盛土施工前にイオン交換工法を施工し、施工後の効果の確認を以下に示す。

5.2.2 物理化学的調査

(1) 鉱物組成

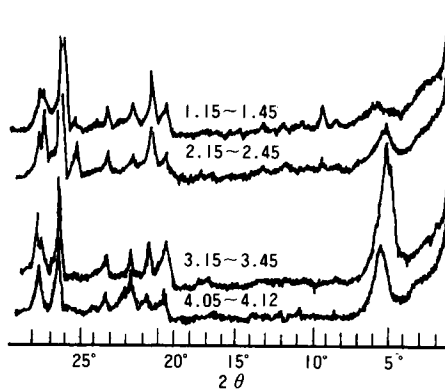


図-5.16 X線回析結果

表-5.14 鉱物組成 (%)

Depth (m)	モンモリロナイト	イライト	カオリナイト	石英	長石
1.15-1.45	7.1	8.3	3.4	67.2	14.0
2.15-2.45	10.2	2.7	4.0	62.7	20.4
3.15-3.45	40.0	3.3	3.5	31.9	21.3
4.05-4.12	29.4	5.0	4.6	37.4	23.6

図-5.16はX線回析による粘土鉱物の同定を行なって結果を示し、表-5.14と表-5.15に各鉱物組成を示している。当斜面は粘土層を主体とし、底部に泥岩層がある。鉱物組成としては、1.15～1.45m, 2.15～2.45mでは石英が多く、3.15～3.45mでは粘土鉱物の含有量が大で、その中でも活性粘土であるモンモリロナイトの含有量が異常に大であった。4.05～4.12mも粘土鉱物が多く、29.4%もモンモリロナイトを含有している。また、粘土鉱物中でのモンモリロナイトの含有量をみると、3.15～3.45mの層においね、85.5%と極めて高い値を示している。このことから、将来の高盛土によって、この層にすべり面が形成される事が予測される。

表-5-15 粘土鉱物含有量 (%)

Depth(m)	土 質 名	色 調	モンモリロナイト	イライト	カオリナイト
1.15-1.45	シルト質粘土	褐色	37.6	43.9	18.5
2.15-2.45	シルト質粘土	褐色	60.5	15.8	23.7
3.15-3.45	粘 土	茶褐色	85.5	7.0	7.5
4.05-4.12	泥岩 岩	茶褐色	75.4	12.9	11.7

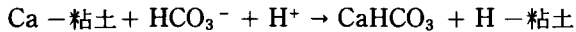
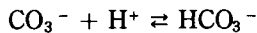
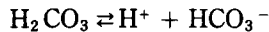
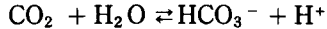
(2) 吸着カチオンと C.E.C.

表-5-16 吸着カチオンと C.E.C.(m.e.q./100 g)

Depth (m)	K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Other ions	CEC
1.15-1.45	1.54	0.81	8.62	4.89	22.04	37.90
2.15-2.45	1.35	0.94	9.61	4.46	13.75	30.20
3.15-3.45	1.18	1.68	17.94	7.29	29.11	57.20
4.05-4.12	3.02	4.70	20.44	5.45	10.99	44.60

吸着カチオンと C.E.C. の測定結果を表-5-16に示した。当斜面構成土は一般的に C.E.C. の値が高くでている。これはモンモリロナイトの含有量の多い事と極めて良く一致している。吸着カチオンでは、母

岩の特性による Ca⁺⁺ と Mg⁺⁺ が多くでているが、最も多いのは (H⁺ + Al⁺⁺⁺) と推定される他のイオンである。これは地下水中の遊離炭酸イオン (HCO₃⁻) が次のような過程により、土粒子に吸着したカチオンを溶脱したものと考えられる。



生成された重炭酸カルシウムは水溶解性であり、地下水で運搬される。その結果、地すべり粘土は水素粘土化し、強度その他の工学的性質の弱体化が起る。

表-5-17は地下水中の溶存カチオンの測定結果であるが、後述するように、イオン交換工法を施工するために、図-5-17に示すように観測井を設けた。当地では Na⁺ が非常に多く溶存している。現地採取土で、各カチオン濃度を変化させ、自由膨潤量試験を行なった結果、現地の地下水で最も膨潤量が大きであった。

表-5-17 地下水中の溶存カチオン (p.p.m.)

採水位置	K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺
No. 1	3.64	23.45	1.06	1.64
No. 2	2.70	25.75	0.32	1.05

土試料の吸着イオンも地下水中の Na⁺ も非常に多いことから、人間の体でいえば、基礎体力がなく、不適合な血液を流しているようなものなので、交換輸血をすべく、以下に述べるようなイオン交換工法を施工した。

5.2.3 イオン交換工法の施工

当斜面は、X線回析結果でも明らかなように、モンモリロナイト系の粘土鉱物を多く含有している。さらに吸着イオンの測定結果では、Na⁺ の吸着が多く、H-粘土化も著しく進行していた。これは第4章で示したように、工学的性質において、極めて弱体化している。ことを意味する。この強度回復を図るためには、もともと当斜面構成土が吸着していた

Ca⁺⁺を補給してやれば良い。

具体的な安定剤としては、塩化カルシウムと消石灰を併用し、地下水流を利用して、イオン交換を行なわせる。

具体的には図-5・17に示すように、ボーリング掘削孔に塩化カルシウムあるいは石灰等を投入し、地下水流によるイオン交換を行なわせるか、注入による強制的な施工のいずれかになる。さらに確実なものとしては、石灰パイルによるイオン交換とクイ効果の併用が得策である。

本対策工も斜面上部の23孔に塩カルを斜面下部の94孔に消石灰を投入した。さらに、観測井を2孔打設した。投入孔の位置は図-5・17に示すとおりである。

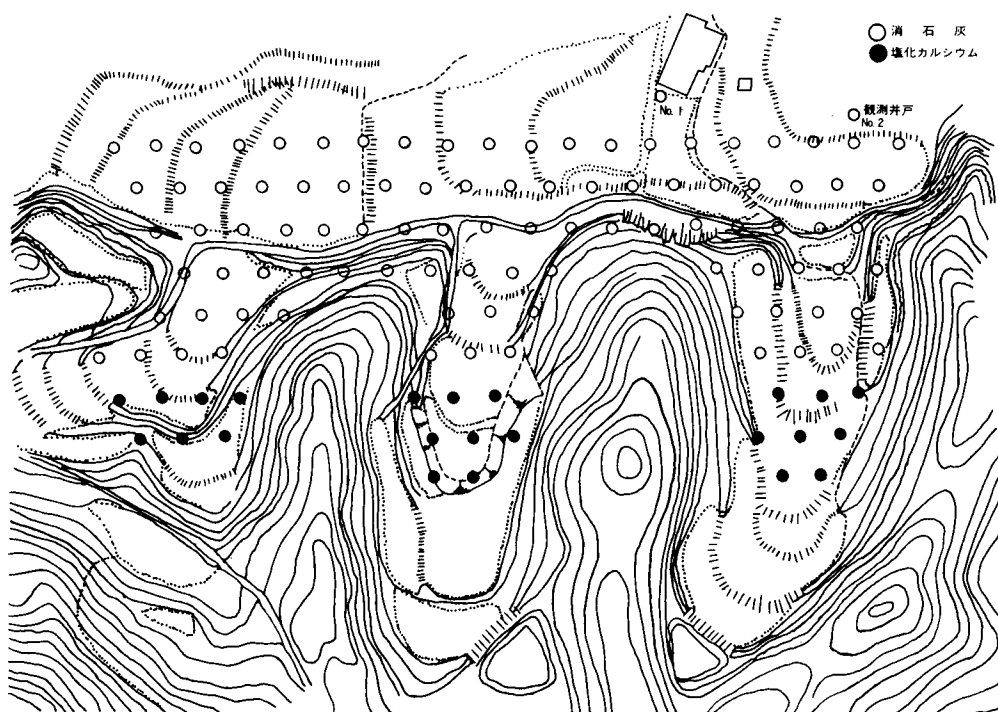


図-5・17 イオン交換工法施工位置図

5.2.4 施工後の効果の確認 (8), (9), (10), (11)

施工後の効果の確認を行なうために地下水中の溶存イオンの変化を追跡した。その結果を図-5・18と図-5・19に示している。図-5・18はCa⁺⁺濃度の変化を示したものであるが、地下水中のCa⁺⁺は施工後100～200日後に顕著な変化を示し、その後も順調に増大している。Na⁺の変化は施工後200日頃まではその濃度が増大し、その後激減して徐々に定常状態に落ちついていく傾向がある。これは土の吸着イオン組成から明らかのように、当初Na⁺が非常に多量に吸着していたため、地下水中に溶け込んだCa⁺⁺によって交換抽出されたNa⁺の増大によるものと考えられる。従って、現地の土はイオン交換工法施工後約250日ではCa⁺⁺で飽和され、安定斜面になったと考えられる。なお、本論文作成時点ですでに9年の年月を経ているが、高盛土が立派に安定した状態にあり、地すべり予防工法としても有効であると確信している。

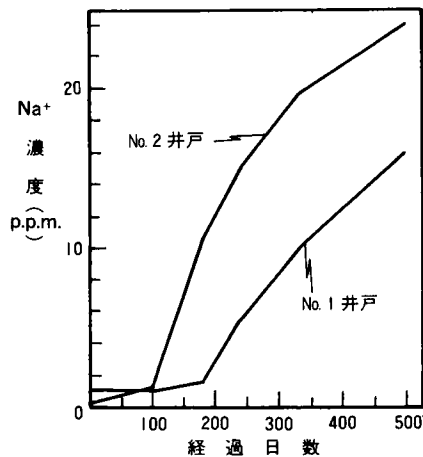


図-5-18 施工後の地下水中の
の Ca^{++} 濃度の変化

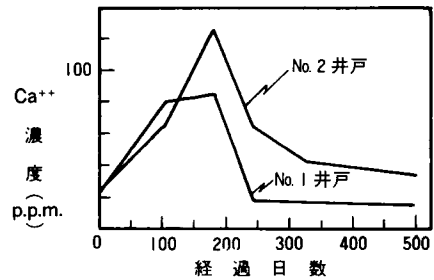


図-5-19 施工後の地下水中の
の Na^{+} 濃度の変化

5.3 結 論

斜面安定工法として、地すべり粘土を改良・強化するイオン交換工法の施工例を2例示したが、どちらの斜面も施工後完全に安定を保っており、成功したものと確信している。

生駒山の地すべりはほぼ10年毎に移動を繰り返し、今回が3度目であったが、イオン交換工法施工後12年経過して安定であることと、イオン交換工法の特長（年を経るごとにイオン交換が進行することと、石灰と周辺土の反応が促進されること）からほぼ永久に安定になったと考えられる。

三田地域における地すべり防護工法としてのイオン交換工法の施工の結果は、地下水中の Na^{+} が約半年にわたって増大し、その後著しく減少することと、 Ca^{++} 濃度が3ヶ月頃から著しく増大することより、施工後約半年で高盛土に対して完全に安定な斜面になることが判明した。

参 考 文 献

- 1) 松尾新一郎, 富田武満: 斜面安定に及ぼすイオン交換の影響, 土木学会第25回年次学術講演会概要集, pp. 441~442, 1970.
- 2) 松尾新一郎, 富田武満: 地すべり粘土の物理化学的性質とその対策について, 第5回土質工学研究発表会講演集, pp. 413~416, 1970.
- 3) 松尾新一郎, 富田武満: 斜面安定に及ぼすイオン交換の影響, 日本材料学会誌「材料」第19巻205号, pp. 53~58, 1970.
- 4) 松尾新一郎, 富田武満: 斜面安定に及ぼすイオン交換の影響, 土木学会関西支部年次学術講演会講演集, III-37, 1971.
- 5) 松尾新一郎, 富田武満, 他: イオン交換工法, 土質安定工法便覧, 日刊工業新聞社pp. 483~495, 1972.
- 6) 松尾新一郎, 富田武満: 斜面安定に及ぼすイオン交換の影響, 第7回土質工学研究発表会講演集, pp. 515~518, 1972.
- 7) 松尾新一郎, 富田武満: 斜面安定に及ぼすイオン交換の影響, 土木学会関西支部年次学術講演会講演集, III-50, 1972.
- 8) 松尾新一郎, 富田武満: 地すべり安定化のためのイオン交換工法の効果の確認について, 地すべり学会第15回研究発表会, pp. 50~51, 1976.
- 9) 松尾新一郎, 富田武満: 地すべりにおける土のイオン交換, 第14回自然災害科学総合シンポジウム, pp. 281~284, 1977.
- 10) 松尾新一郎, 富田武満: 斜面崩壊の予知と対策—物理化学的予知—第11回日本道路会議特定課題論文集, pp. 121~123, 1973.
- 11) 松尾新一郎, 富田武満: 斜面の物理化学的調査と対策について, 土木学会中国・四国支部昭和51年度学術講演会一般講演集, pp. 109~110, 1976.

第6章 結 論

本研究は、地すべりの物理化学的な調査と対策に関してまとめたものである。従来、地すべりに関する取り扱いには純粋力学的な面からのアプローチが多く、地すべりの発生原因から見ると、誘因に力点がおかれていた傾向がある。また、対策についても地すべりの滑動力に対する抑止工としてしか促えられず、莫大な工費を伴う大構造物で対策工が計画されてきた。そこで本研究は地すべりの発生予知に関しては素因に基づく地盤内部の弱線の発見に努め、地すべり対策としては、地すべり地帯特有の粘土鉱物であるモンモリロナイトに対する土質安定の立場からの対策を主とし、最も直接的な安定工法の構築を求めたものである。

ここで、改めて本論文の成果と今後の課題について、章を追って明らかにする。

第1章では地すべりの研究に対する背景を示すと共に、地すべりの定義を言語学的な意味で与えた。さらに地すべりの予知と対策に関しては、物理化学的な手法の必要性を説き、本研究の目的及び構成をも示した。

第2章では、斜面の表面に小孔を掘り、その変形特性から、斜面全体を引張領域、中立領域、圧縮領域に分類することから、斜面の切取の施工管理に利用できることを示した。しかし、現地の土質性状が非常に複雑な事と、土質定数としてのポアソン比、弾性係数の正確な測定が困難な事から、定量的に応力状態を知ることはほとんど不可能であるが、この種の表面応力の測定例を積み重ねる事によって、ある程度定量的な把握は可能であろう。

第3章では地すべり地における斜面構成土の物理化学的特性を解明することによって、すべり面の予知とか対策手法として展開し得ることを明らかにしたが、得られた成果をまとめると次のとおりである。

(1)地すべり斜面構成土の物理化学的特性として、構成鉱物の検討の結果、界面活性の高いモンモリロナイトあるいは非晶質のアロフェンがすべり面付近に卓越している。

(2)これらのイオン交換特性では、高いC.E.C.値を示すこと、このC.E.C.値をモンモリロナイトあるいはアロフェンに起因するものとして逆算した活性粘土鉱物量はX線回析による鉱物分析の結果とよく一致する。

(3)斜面構成土の強熱減量が、モンモリロナイト含有量変化と高い相関をもつことから、すべり面予知のためのパラメーターとして強熱減量法を利用することができる。

(4)X線回析、蛍光X線分析、C.E.C.の測定および強熱減量のいずれの方法を用いても、すべり面の予知が可能であり、更に、将来すべり面となりそうな土層の推定も可能である。

第4章では、地すべり粘土の主要粘土鉱物であるモンモリロナイトの安定処理法としてカリウム固定法とイオン交換法について論述している。第1節ではモンモリロナイトのカリウム固定が、基本的にはモンモリロナイト粘土のイライト粘土への変化であることを示し、K-固定により物理化学的特性が極端に変化する事を、各種機器分析により示した。さらに、工学的にもカリイオンのモンモリロナイト層間への固定による固結・団粒化作用が土性改良の主因であり、特に高含水比での改良効果の著しいことが判明した。第2節では、モンモリロナイトをNa, Ca, Mg等の塩類でイオン交換させた場合の工学的諸特性の変化を示した。Ca, Mgを吸着したモンモリロナイトは膨潤抑制効果著しいため、有効応力の増大につながると共に、団粒化による土性改良効果著しいものがあつた。Na吸着モンモリロナイトは、Na⁺の水和径が大であるので、結晶格子の膨潤が著しく、細粒子である

モンモリロナイトを分散構造にすることによって、強度その他の特性が悪くなる傾向が見られた。しかし、Na 処理でも、濃度を高くし、間げ水中の塩濃度を大にすれば、2 価カチオン処理と同程度の改良効果を発揮する。

第5章では、地すべり粘土に対する前章の改良効果にのっとり、イオン交換工法の施工例を示した。生駒山の地すべりにおいては、地すべり粘土がカオリナイトを主体とし若干のモンモリロナイトであったが、イオン交換と石灰のクイ効果が顕著に見られた。また、三田では、地形的・地質的あるいは盛土計画から判断しても地すべりの発生が予測された斜面への防護工法としてのイオン交換工法の施工であった。施工後3ヶ月後から盛土が行なわれたが、斜面崩壊を生じることなく、現在まで安定を保っている。両施工例とも、イオン交換の進行状態を確認すべく地下水中の溶存イオンの変化を調査したが、施工直後から3ヶ月までは、事前に土に吸着していたイオン濃度が急速に増え、その後極端に減少すると共に、処理したCa イオン濃度が急速に増大する傾向がみられた。このことから、イオン交換工法が完全に効果を示すのが、施工後1～2ヶ月後であり、その後時間の経過と共に安定度を増す。

今後の研究課題として、本研究で取りあげた斜面以外の実斜面での物理化学的予知と地すべり粘土の安定処理の施工例を増やすことによって合理的な設計法の確立が可能となり、必要となろう。

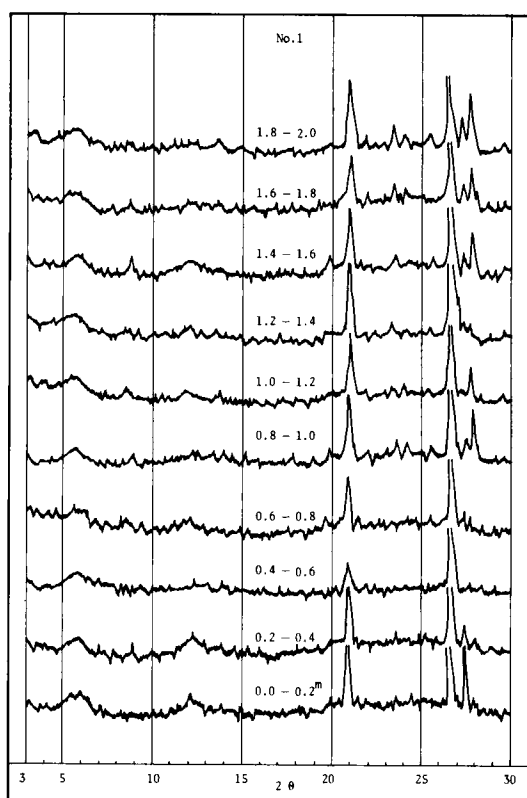
謝 辞

本論文は著者が京都大学工学部土木工学教室に在職中及びそれ以降の研究成果をとりまとめたものである。この間終始御指導，御鞭撻を賜わった京都大学教授工学博士松尾新一郎先生に衷心より感謝の念を表する次第である。また，松尾先生より実験に必要な最新の分析機器及び安定工法に関する現場実験の機会を与えていただいた御厚情が本論文作成の原動力になった。

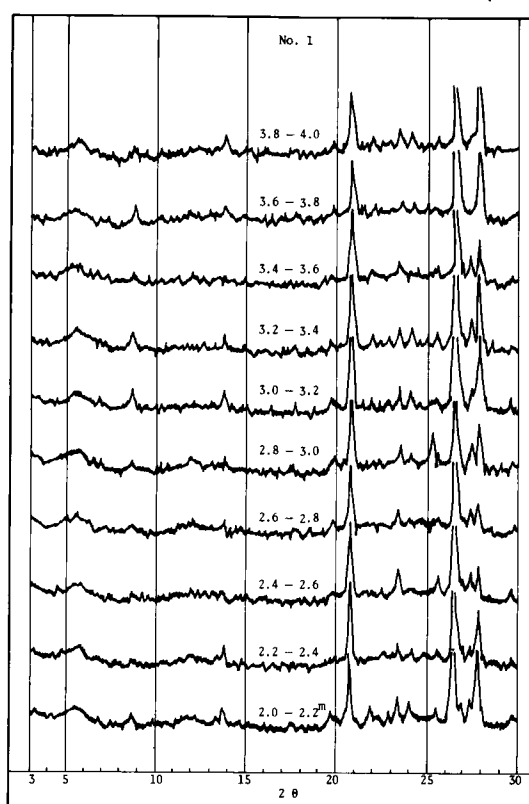
最後に，研究，実験に際し御協力，御便宜をはかっていただいた京都大学工学部土木工学教室土質力学研究室の関係者ならびに福山大学工学部土木工学科の方々に心から感謝の意を表します。

付

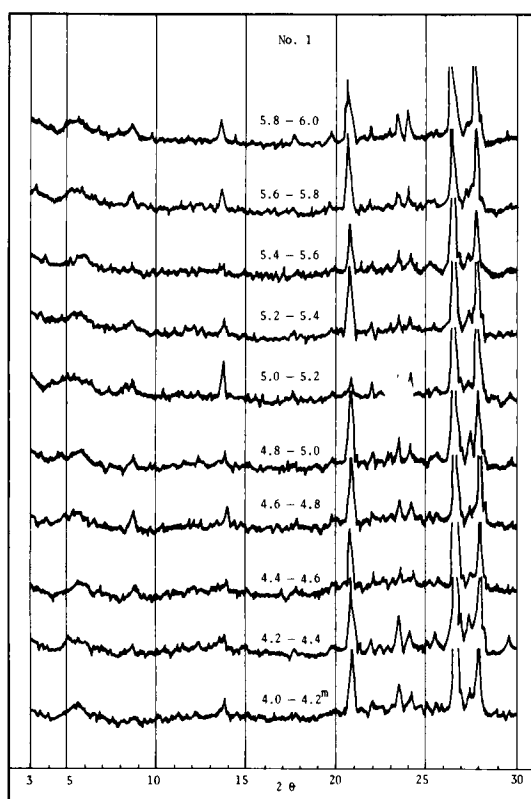




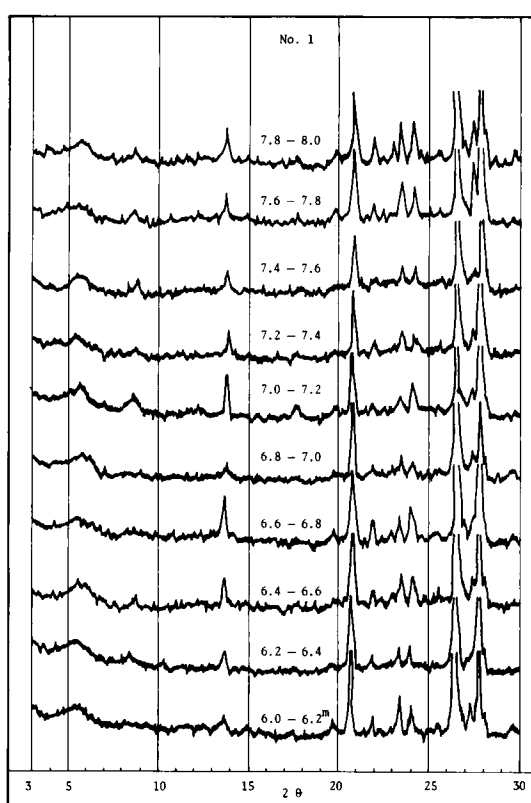
付図-3-1 X線回析図



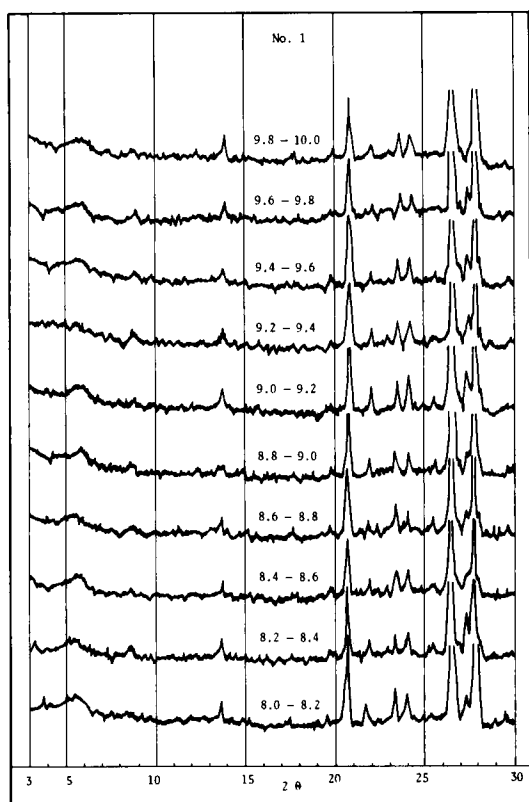
付図-3-2 X線回析図



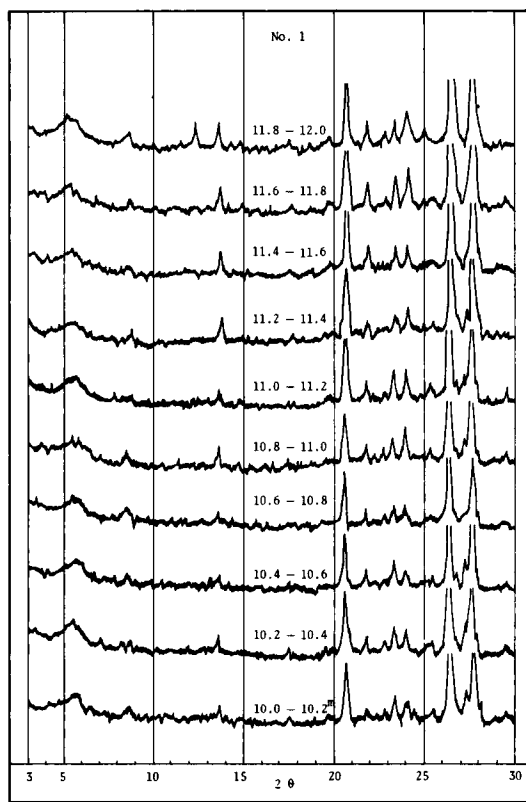
付図-3-3 X線回析図



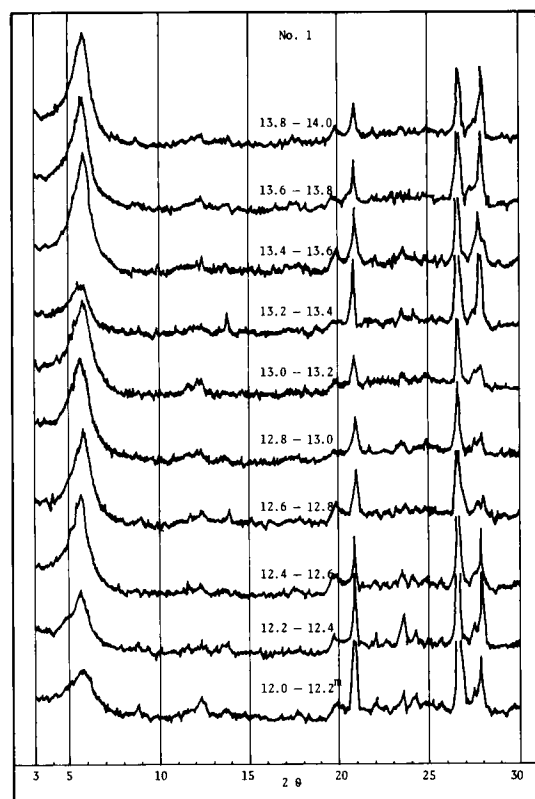
付図-3-4 X線回析図



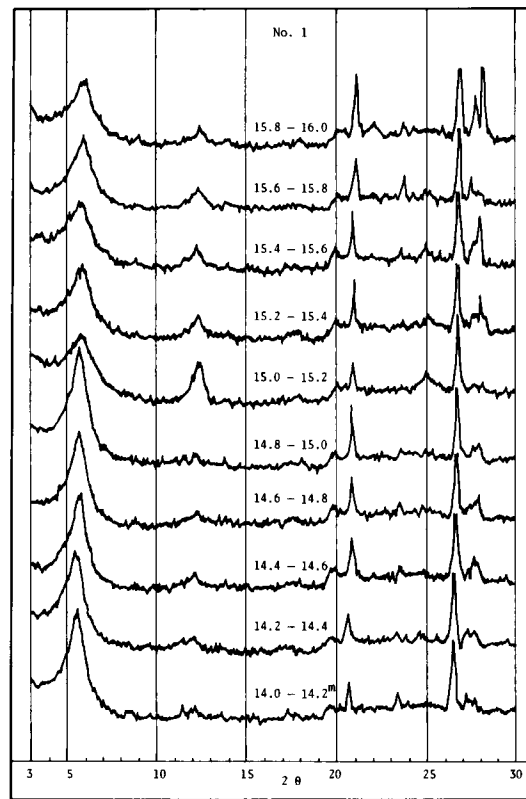
付図-3-5 X線回析図



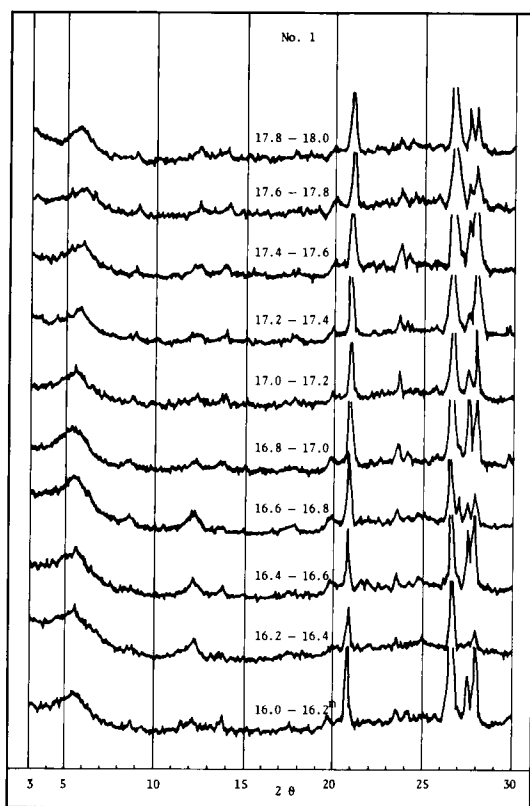
付図-3-6 X線回析図



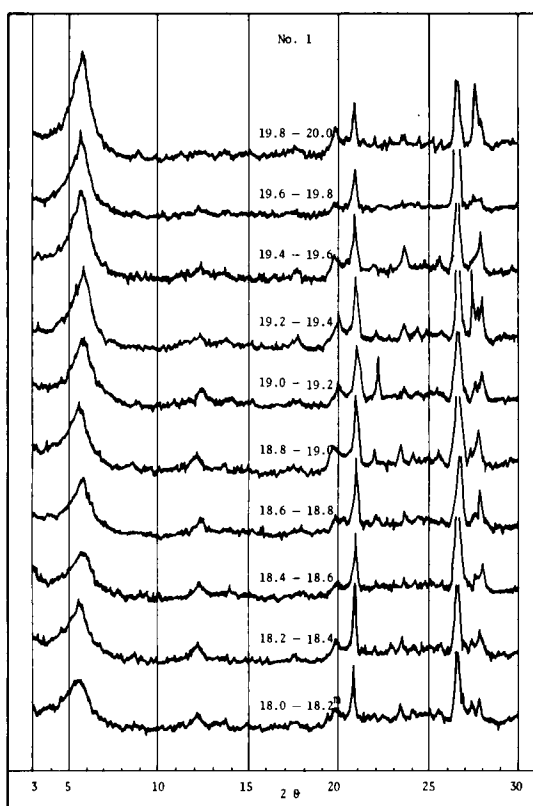
付図-3-7 X線回析図



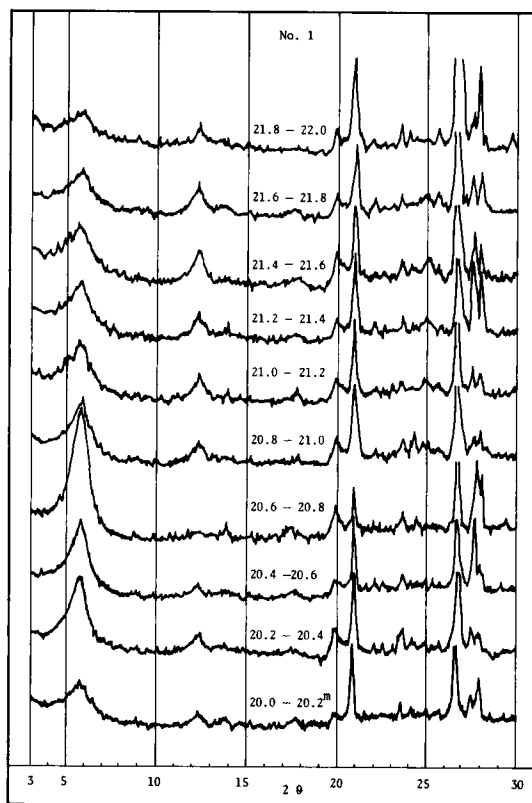
付図-3-8 X線回析図



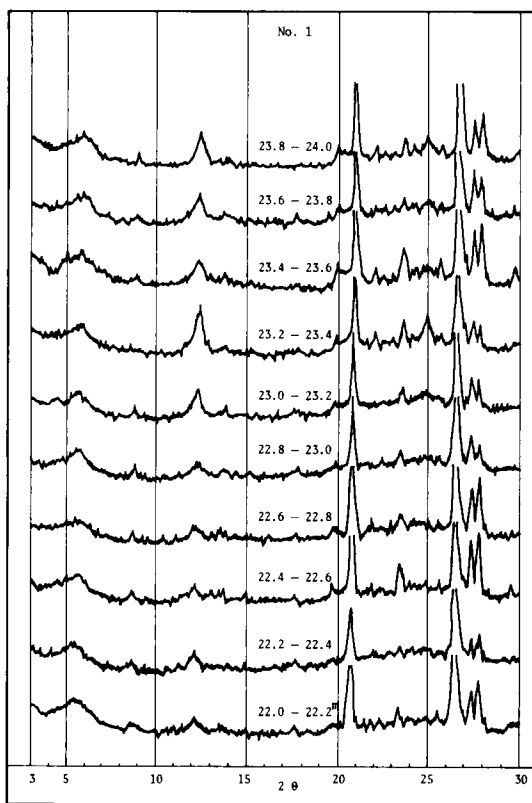
付図-3-9 X線回析図



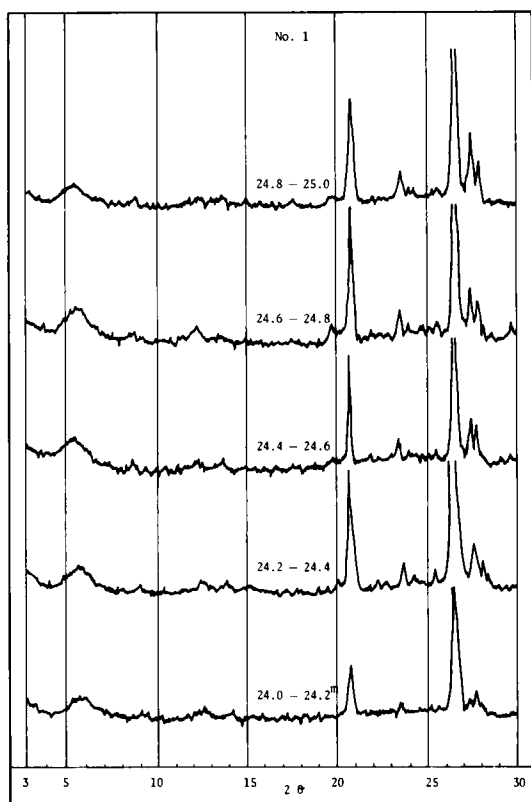
付図-3-10 X線回析図



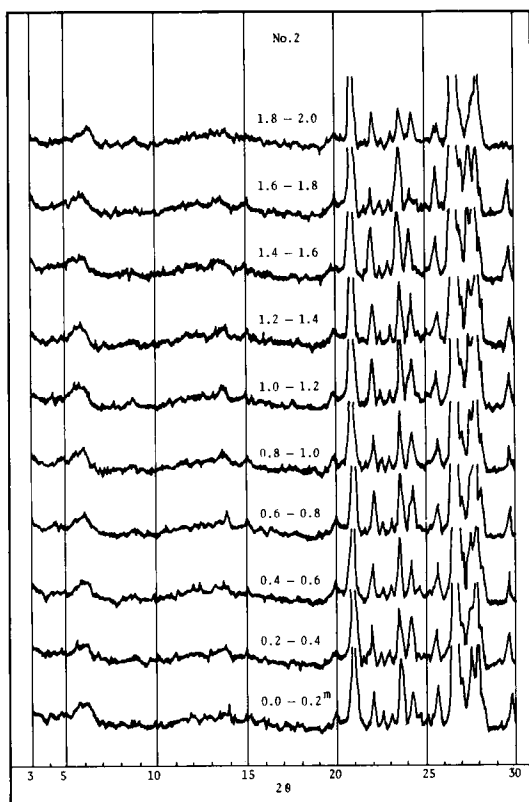
付図-3-11 X線回析図



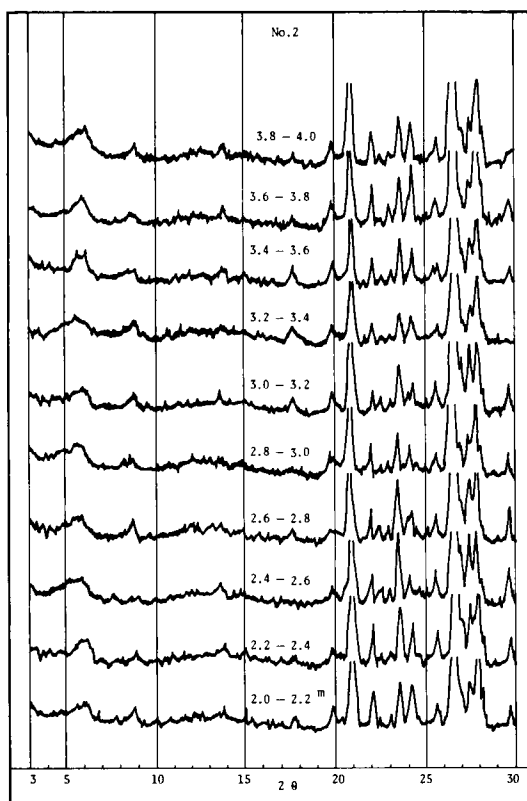
付図-3-12 X線回析図



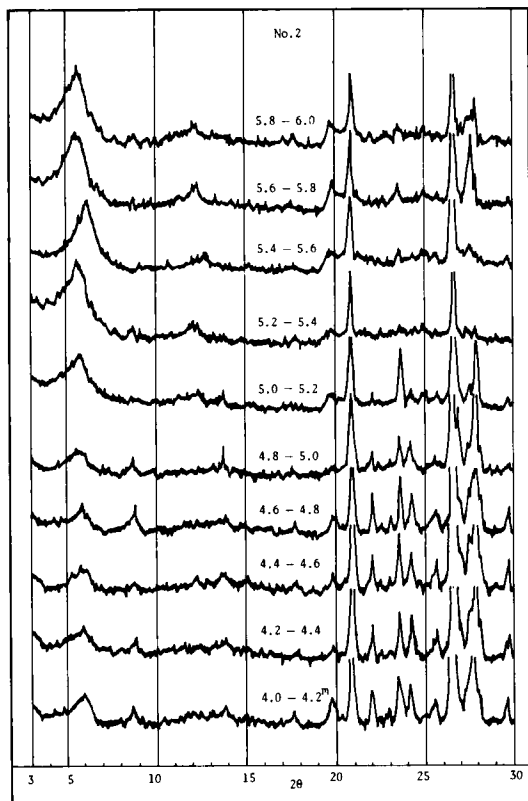
付図-3.13 X線回析図



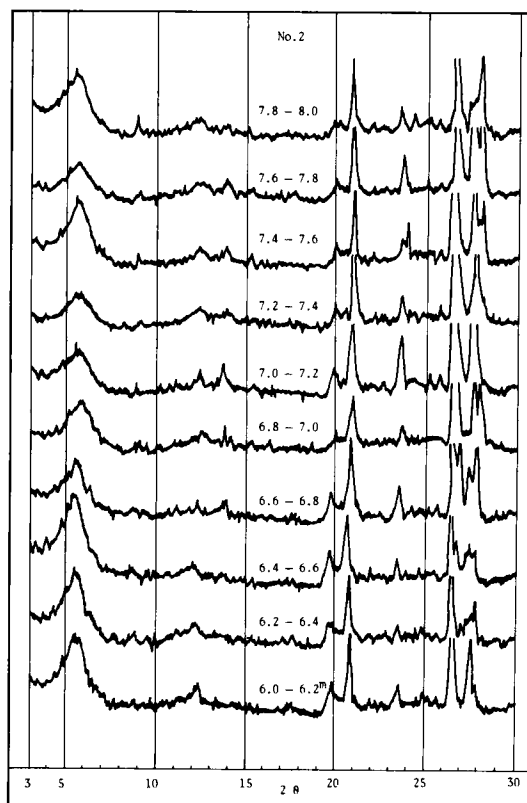
付図-3.14 X線回析図



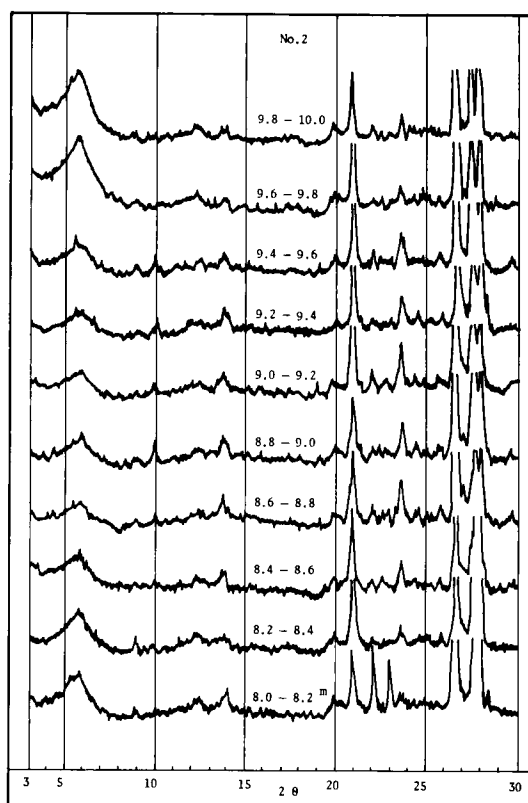
付図-3.15 X線回析図



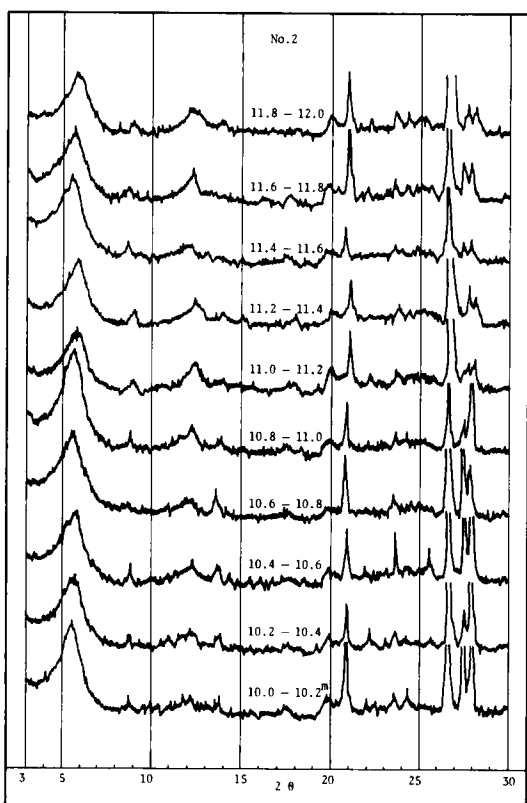
付図-3.16 X線回析図



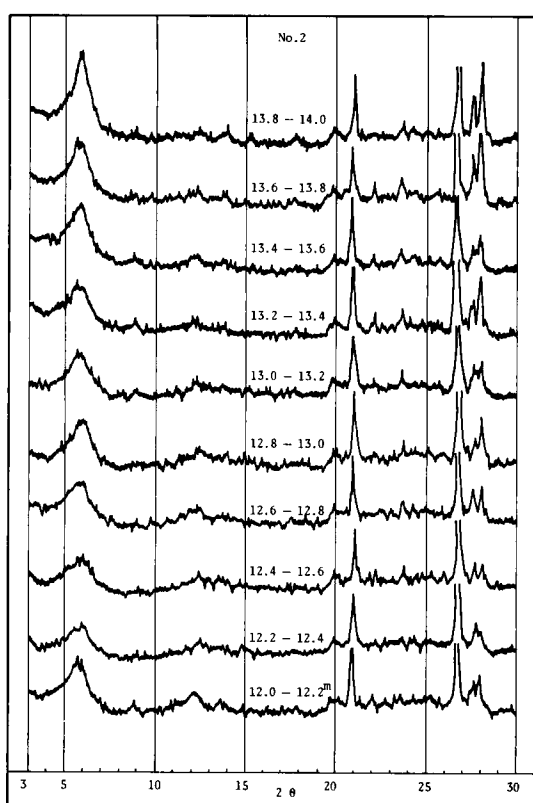
付図-3-17 X線回析図



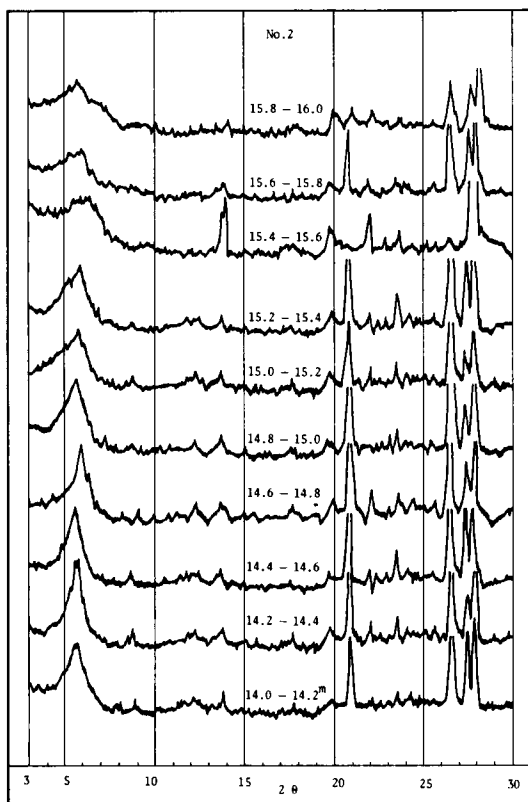
付図-3-18 X線回析図



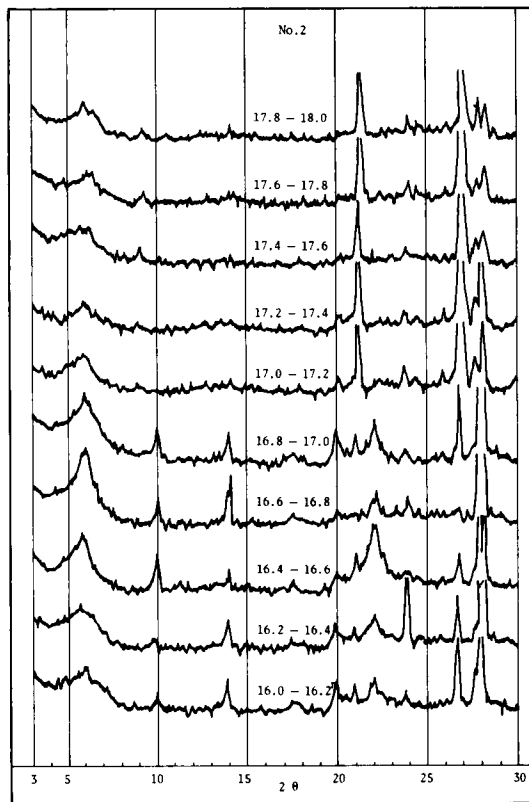
付図-3-19 X線回析図



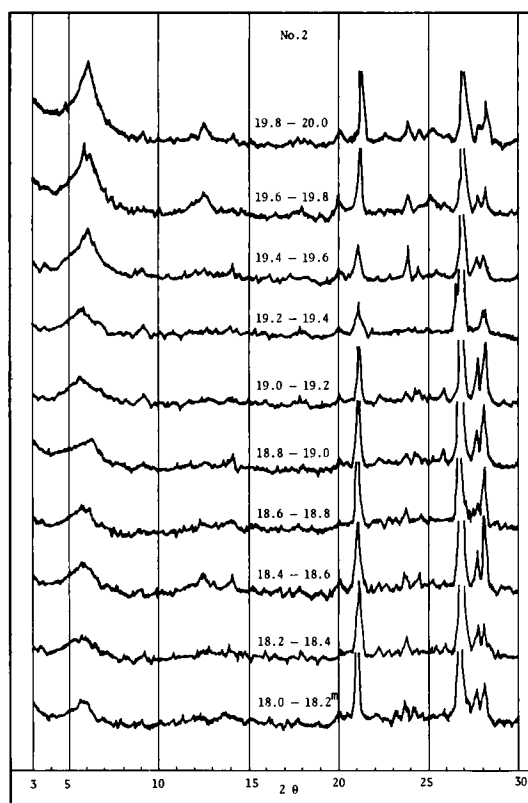
付図-3-20 X線回析図



付図-3-21 X線回析図



付図-3-22 X線回析図



付図-3-23 X線回析図

付表3-1 遊離カチオン (meq/100g) (ボーリングNo.1)

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺		Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺		Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
0.0m	0.908	0.323	0.036	0.014	3.0m	1.283	0.067	0.188	0.008	6.0m	0.618	0.026	0.036	0.362
0.2	1.388	0.382	0.072	0.007	3.2	0.816	0.047	0.081	0.007	6.2	0.744	0.074	0.048	0.383
0.4	0.959	0.078	0.083	0.014	3.4	1.118	0.044	0.070	0.014	6.4	1.746	0.198	0.140	0.907
0.6	0.890	0.187	0.045	0.729	3.6	0.479	0.063	0.024	0.007	6.8	1.072	0.174	0.064	0.387
0.8	1.302	0.107	0.030	0.209	3.8	0.470	0.065	0.012	0.015	7.0	1.315	0.281	0.179	1.031
1.0	0.627	0.196	0.075	0.073	4.0	0.770	0.088	0.049	0.052	7.2	1.045	0.277	0.089	0.519
1.2	0.867	0.051	0.023	0.089	4.2	0.616	0.051	0.059	0.057	7.4	1.288	0.226	0.077	0.333
1.4	0.801	0.075	0.024	0.048	4.4	1.414	0.116	0.090	0.071	7.6	1.227	0.250	0.051	0.255
1.6	0.850	0.052	0.077	0.008	4.6	1.045	0.076	0.065	0.133	7.8	1.166	0.210	0.064	0.232
1.8	1.396	0.143	0.064	0.008	4.8	1.018	0.065	0.123	0.120	8.0	1.133	0.230	0.064	0.309
2.0	0.903	0.067	0.128	0.131	5.0	0.692	0.073	0.126	0.097	8.2	1.489	0.321	0.103	0.918
2.2	1.153	0.115	0.115	0.015	5.2	0.489	0.053	0.073	0.074	8.4	1.550	0.229	0.116	0.652
2.4	0.755	0.075	0.179	0.132	5.4	0.811	0.049	0.061	0.052	8.4	1.427	0.201	0.118	0.536
2.6	0.620	0.035	0.197	0.007	5.6	0.715	0.044	0.051	0.077	8.6	1.267	0.209	0.119	0.538
2.8	1.051	0.070	0.145	0.056	5.8	0.539	0.071	0.026	0.054	8.8	1.306	0.169	0.081	0.008

付表3-2 遊離カチオン (meq/100g) (ボーリングNo.1)

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺		Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺		Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
9.0m	1.041	0.152	0.068	0.165	12.0m	1.487	0.024	0.092	0.954	15.0m	1.321	0.115	0.039	0.312
9.2	0.792	0.154	0.082	0.058	12.2	0.899	0.020	0.093	0.795	15.2	1.888	0.012	0.036	0.316
9.4	1.024	0.103	0.055	0.142	12.4	0.795	0.012	0.131	0.477	15.4	4.612	0.114	0.026	0.031
9.6	1.194	0.069	0.037	0.600	12.6	0.865	0.016	0.078	0.478	15.6	2.055	0.056	0.013	0.158
9.8	1.305	0.077	0.038	0.525	12.8	0.934	0.041	0.091	0.475	15.8	2.494	0.028	0.014	0.039
10.0	1.638	0.071	0.013	0.465	13.0	0.830	0.037	0.090	0.636	16.0	3.809	0.032	0.012	0.063
10.2	1.955	0.067	0.013	0.543	13.2	1.060	0.022	0.036	0.145	16.2	3.042	0.027	0.011	0.055
10.4	1.787	0.055	0.038	0.467	13.4	1.009	0.015	0.035	0.290	16.4	2.603	0.016	0.015	0.094
10.6	1.618	0.054	0.051	0.388	13.6	0.725	0.019	0.012	0.123	16.6	2.877	0.004	0.014	0.047
10.8	1.281	0.052	0.077	0.544	13.8	0.946	0.030	0.024	0.218	16.8	4.289	0.052	0.012	0.145
11.0	1.315	0.059	0.115	1.550	14.0	1.692	0.043	0.038	0.305	17.0	1.791	0.185	0.024	0.218
11.2	1.207	0.046	0.037	0.375	14.2	0.929	0.039	0.025	0.152	17.2	1.224	0.159	0.036	0.147
11.4	1.234	0.048	0.038	0.387	14.4	1.429	0.115	0.038	0.465	17.4	1.501	0.187	0.035	0.143
11.6	0.964	0.052	0.064	0.310	14.6	1.281	0.052	0.039	0.310	17.6	1.325	0.159	0.037	0.149
11.8	1.011	0.023	0.062	0.225	14.8	1.268	0.016	0.037	0.312	17.8	1.135	0.160	0.038	0.151

付表 3-3 遊離カチオン (meq /100g) (ボーリングNo.1)

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
18.0m	1.325	0.237	0.036	0.145
18.2	1.400	0.133	0.012	0.147
18.4	2.750	0.078	0.014	0.290
18.6	1.602	0.211	0.072	0.294
18.8	2.069	0.397	0.143	1.595
19.0	1.552	0.263	0.073	0.292
19.2	1.122	0.138	0.037	0.300
19.4	1.723	0.027	0.035	0.306
19.6	1.905	0.031	0.025	0.296
19.8	1.957	0.065	0.036	0.150

付表 3-4 遊離カチオン (meq /100g) (ボーリングNo.2)

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺		Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺		Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
0.0m	0.463	0.054	0.025	0.067	3.0m	1.322	0.121	0.211	0.384	6.0m	0.437	0.112	0.050	0.067
0.2	0.685	0.052	0.049	0.180	3.2	1.559	0.262	0.316	0.376	6.2	0.587	0.113	0.061	0.263
0.4	0.437	0.027	0.012	0.052	3.4	1.489	0.260	0.213	0.280	6.4	1.214	0.230	0.100	0.443
0.6	0.587	0.031	0.024	0.142	3.6	1.558	0.217	0.263	0.472	6.6	0.900	0.138	0.122	0.267
0.8	1.057	0.081	0.050	0.120	3.8	1.656	0.176	0.264	0.468	6.8	1.090	0.192	0.099	0.360
1.0	0.587	0.065	0.074	0.184	4.0	1.348	0.198	0.102	0.186	7.0	0.574	0.080	0.101	0.366
1.2	1.148	0.384	0.197	0.360	4.2	1.059	0.226	0.103	0.178	7.2	0.698	0.165	0.122	0.443
1.4	0.966	0.111	0.099	0.176	4.4	0.742	0.170	0.051	0.147	7.4	1.044	0.219	0.096	0.447
1.6	1.406	0.205	0.237	0.384	4.6	0.836	0.227	0.104	0.124	7.6	0.626	0.086	0.026	0.048
1.8	1.510	0.233	0.263	0.472	4.8	1.059	0.281	0.115	0.372	7.8	0.529	0.119	0.053	0.056
2.0	1.754	0.217	0.316	0.468	5.0	1.268	0.171	0.332	0.550	8.0	0.466	0.087	0.013	0.057
2.2	1.573	0.221	0.369	0.476	5.2	1.070	0.138	0.049	0.105	8.2	0.828	0.233	0.026	0.072
2.4	1.803	0.323	0.448	0.848	5.4	0.685	0.065	0.051	0.052	8.4	0.696	0.231	0.039	0.080
2.6	1.990	0.234	0.474	0.568	5.6	0.607	0.066	0.123	0.127	8.6	0.626	0.147	0.052	0.120
2.8	1.489	0.119	0.184	0.280	5.8	0.855	0.081	0.098	0.112	8.8	1.116	0.150	0.086	0.122

付表3-5 遊離カチオン (meq /100g)

(ボーリングNo.2)

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺		Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺		Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
9.0m	0.502	0.115	0.037	0.090	12.0m	1.148	0.039	0.068	0.096	15.0m	2.832	0.077	0.025	0.022
9.2	0.803	0.134	0.038	0.092	12.2	1.439	0.047	0.064	0.053	15.2	2.362	0.065	0.036	0.030
9.4	0.607	0.157	0.074	0.052	12.4	1.079	0.020	0.008	0.046	15.4	2.675	0.050	0.023	0.045
9.6	0.763	0.272	0.088	0.135	12.6	1.092	0.016	0.013	0.015	15.6	2.364	0.008	0.022	0.052
9.8	0.652	0.161	0.085	0.090	12.8	1.321	0.012	0.015	0.031	15.8	2.834	0.038	0.020	0.083
10.0	0.568	0.015	0.037	0.067	13.0	1.463	0.024	0.038	0.039	16.0	2.023	0.176	0.013	0.084
10.2	0.502	0.107	0.086	0.082	13.0	1.348	0.028	0.041	0.085	16.2	2.932	0.199	0.015	0.088
10.4	0.522	0.054	0.074	0.075	13.4	1.841	0.015	0.043	0.078	16.4	2.667	0.156	0.026	0.080
10.6	0.607	0.046	0.049	0.105	13.6	2.310	0.031	0.049	0.165	16.6	2.560	0.137	0.028	0.068
10.8	0.346	0.004	0.040	0.060	13.8	2.466	0.038	0.052	0.128	16.8	1.041	0.183	0.038	0.061
11.0	0.587	0.038	0.042	0.067	14.0	2.362	0.042	0.054	0.195	17.0	1.638	0.152	0.035	0.053
11.2	0.796	0.156	0.050	0.038	14.2	1.742	0.042	0.074	0.052	17.2	1.373	0.051	0.025	0.023
11.4	0.783	0.059	0.052	0.030	14.4	2.258	0.058	0.077	0.022	17.4	1.274	0.109	0.015	0.030
11.6	0.643	0.082	0.056	0.046	14.6	2.310	0.057	0.086	0.030	17.6	1.174	0.156	0.009	0.038
11.8	0.796	0.090	0.062	0.084	14.8	1.729	0.032	0.041	0.045	17.8	1.280	0.125	0.007	0.046

付表3-6 遊離カチオン (meq /100g)

(ボーリングNo.2)

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺		Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺		Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
18.0m	1.678	0.043	0.010	0.060	21.0m	2.545	0.043	0.011	0.039	24.0m	1.217	0.133	0.005	0.058
18.2	2.182	0.059	0.022	0.046	21.2	2.318	0.040	0.013	0.052	24.2	1.179	0.115	0.037	0.072
18.4	2.936	0.069	0.025	0.128	21.4	1.860	0.053	0.014	0.053	24.4	1.716	0.171	0.034	0.457
18.6	2.310	0.050	0.011	0.075	21.6	1.453	0.057	0.012	0.045	24.6	1.097	0.007	0.048	0.074
18.8	2.675	0.042	0.008	0.083	21.8	1.679	0.156	0.021	0.039	24.8	1.003	0.096	0.036	0.181
19.0	3.249	0.041	0.007	0.052	22.0	1.171	0.066	0.026	0.013					
19.2	2.832	0.035	0.006	0.045	22.2	1.057	0.096	0.032	0.014					
19.4	4.091	0.038	0.013	0.022	22.4	1.091	0.014	0.015	0.019					
19.6	1.886	0.015	0.005	0.037	22.6	1.171	0.199	0.016	0.006					
19.8	2.310	0.040	0.012	0.030	22.8	1.131	0.040	0.011	0.020					
20.0	2.205	0.081	0.025	0.030	23.0	1.199	0.041	0.005	0.026					
20.2	1.938	0.042	0.011	0.037	23.2	1.671	0.037	0.008	0.051					
20.4	2.258	0.039	0.009	0.045	23.4	1.673	0.039	0.036	0.065					
20.6	2.571	0.023	0.010	0.060	23.6	1.192	0.033	0.016	0.028					
20.8	2.680	0.060	0.006	0.046	23.8	1.684	0.019	0.013	0.036					

付表3-7 吸着カチオン、C.E.C、吸着カチオン/C.E.C (ボーリングNo1)

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	C.E.C (meg/100g)	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	other (%)
0.0m	0.248	1.546	0.284	2.085	18.600	1.3	8.3	1.5	11.2	77.7
0.2	0.261	1.504	0.383	2.498	13.875	1.9	10.8	2.8	18.0	66.5
0.4	0.157	1.212	0.247	0.675	16.800	0.9	7.2	1.5	4.0	86.4
0.6	0.278	1.998	0.415	0.949	16.650	1.7	12.0	2.5	5.7	78.1
0.8	0.446	1.318	0.244	2.431	22.275	2.0	5.9	1.0	10.9	80.2
1.0	0.161	1.382	0.318	1.037	14.550	1.1	9.5	2.2	7.1	80.1
1.2	0.226	1.401	0.403	1.482	11.471	2.0	12.2	3.5	12.9	69.4
1.4	0.342	2.150	0.269	1.134	13.024	2.6	16.3	2.1	8.7	70.3
1.6	0.741	1.625	1.925	3.023	11.989	6.2	13.6	16.1	25.2	38.9
1.8	1.348	1.268	0.829	6.200	13.031	10.3	9.7	6.4	47.6	26.0
2.0	0.626	0.900	1.211	2.720	15.611	4.0	5.8	7.8	17.4	65.0
2.2	0.835	1.268	1.132	3.840	16.215	5.1	7.8	7.0	23.7	56.4
2.4	0.405	1.150	1.237	1.500	11.270	3.6	10.2	11.0	13.3	61.9
2.6	0.411	1.154	0.842	2.790	13.160	3.1	8.8	6.4	21.2	60.5
2.8	0.546	1.229	0.472	1.705	15.680	3.5	7.8	3.0	10.9	74.8

0.0m=0.0m-0.2m

付表3-8 吸着カチオン、C.E.C、吸着カチオン/C.E.C (ボーリングNo1)

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	C.E.C (meg/100g)	Na ⁺	K ⁺	Md ²⁺	Ca ²⁺	other (%)
3.0m	0.607	1.545	0.880	2.782	14.840	4.1	10.4	5.9	18.7	60.9
3.2	0.522	0.007	1.036	2.700	17.780	2.9	5.6	5.8	15.2	70.5
3.4	0.528	1.304	1.111	3.000	21.210	2.5	6.1	5.2	14.1	72.1
3.6	0.539	0.991	1.148	2.480	14.105	3.8	7.0	8.1	17.6	63.5
3.8	0.546	1.031	1.071	2.325	13.640	4.0	7.6	7.9	17.0	63.5
4.0	0.412	0.808	0.481	1.659	11.238	3.7	7.2	4.3	14.8	70.0
4.2	0.419	0.566	0.520	1.896	17.360	2.4	3.3	3.0	10.9	80.4
4.4	0.430	0.928	1.167	2.640	11.703	3.7	7.9	10.0	22.6	55.8
4.6	0.574	0.802	0.706	3.795	12.710	4.5	6.3	5.6	29.9	53.7
4.8	0.425	0.625	0.670	3.912	13.640	3.1	4.6	4.9	28.7	58.7
5.0	0.638	1.626	2.412	21.310	40.843	1.6	4.6	5.9	52.2	36.3
5.2	0.766	1.678	2.632	30.180	56.808	1.3	4.0	4.6	45.2	48.5
5.4	0.696	0.777	2.501	28.263	62.465	1.1	1.2	4.0	45.2	48.5
5.6	0.567	1.667	2.481	31.071	51.228	1.1	3.3	4.8	60.7	30.1
5.8	0.565	1.665	2.615	29.281	54.018	1.0	3.1	4.8	54.2	36.9

付表 3-9 吸着カチオン、C.E.C、吸着カチオン/C.E.C (ボーリングNa1)

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	C.E.C (meq/100 g)	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	other (%)
6.0m	0.502	1.561	1.914	32.934	51.375	1.0	3.0	3.7	64.1	28.2
6.2	0.511	1.519	1.289	27.829	45.008	1.1	3.4	2.9	61.8	30.8
6.4	0.583	1.489	2.058	28.898	45.000	1.3	3.3	4.6	64.2	26.6
6.6	0.548	1.438	1.708	30.073	43.200	1.3	3.3	4.0	69.6	21.8
6.8	0.425	1.330	1.935	27.146	41.325	1.0	3.2	4.7	65.7	25.4
7.0	0.423	1.321	1.371	24.223	37.725	1.1	3.5	3.6	64.2	27.6
7.2	0.514	1.268	1.253	24.478	41.773	1.2	3.0	3.0	58.6	34.2
7.4	0.430	1.090	0.960	24.025	39.917	1.1	2.7	2.4	60.2	33.6
7.6	0.553	1.186	1.099	20.699	38.053	1.5	3.1	2.9	54.4	38.1
7.8	0.488	1.321	1.208	25.870	39.913	1.2	3.3	3.0	64.8	27.7
8.0	0.585	1.178	1.000	23.729	38.983	1.5	3.0	2.6	60.9	32.0
8.2	0.521	1.305	0.935	26.459	41.703	1.2	3.1	2.2	63.4	30.1
8.4	0.643	1.087	0.888	10.735	22.275	2.9	4.9	4.0	48.2	40.0
8.6	0.657	1.193	0.683	10.122	24.975	2.6	4.8	2.7	40.5	49.4
8.8	0.574	1.215	0.760	12.194	24.969	2.3	4.9	3.0	48.8	41.0

付表 3-10 吸着カチオン、C.E.C、吸着カチオン/C.E.C (ボーリングNa1)

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	C.E.C (meq/100 g)	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	other (%)
9.0m	0.617	1.186	0.977	13.569	23.175	2.7	5.1	4.2	58.6	29.4
9.2	0.574	1.080	1.357	16.162	24.075	2.4	4.5	5.6	67.1	20.4
9.4	0.524	1.086	0.882	11.280	25.875	2.0	4.2	3.4	43.6	46.8
9.6	0.481	1.305	1.110	32.435	43.794	1.1	3.0	2.5	74.1	19.3
9.8	0.516	1.307	1.056	31.705	47.775	1.1	2.7	2.2	66.4	27.6
10.0	0.629	1.367	1.109	33.814	49.725	1.3	2.7	2.2	68.0	25.8
10.2	0.608	1.396	1.377	30.327	38.919	1.6	3.6	3.5	77.9	13.4
10.4	0.742	1.484	1.323	30.330	37.944	2.0	3.9	3.5	79.9	10.7
10.6	0.756	1.455	1.417	31.057	41.844	1.8	3.5	3.4	74.2	18.3
10.8	0.575	1.152	1.244	31.437	42.160	1.4	2.7	3.0	74.6	18.3
11.0	0.843	1.869	1.464	34.188	45.120	1.9	4.1	3.2	75.8	15.0
11.2	0.808	1.784	0.920	28.686	46.080	1.8	3.9	2.0	62.3	30.3
11.4	0.966	1.986	0.959	39.611	56.720	1.7	3.5	1.7	69.8	23.3
11.6	0.891	1.813	0.946	29.394	44.080	2.0	4.1	2.1	66.7	25.1
11.8	0.904	1.796	0.985	29.865	46.085	2.0	3.9	2.1	64.8	27.2

付表3-12 吸着カチオン、C.E.C、吸着カチオン/C.E.C (ボーリングNo.1)

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	CEC (meq/100g)	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	other (%)
15.0m	1.060	1.639	0.990	28.942	49.725	2.1	3.3	2.0	58.2	34.4
15.2	1.350	1.220	1.742	24.601	47.775	2.8	2.6	3.6	51.5	39.5
15.4	1.804	1.535	1.264	25.324	75.319	2.4	2.0	1.7	33.6	60.3
15.6	0.711	1.454	0.814	26.946	34.938	2.0	4.2	2.3	77.1	14.4
15.8	1.364	1.669	1.185	40.418	60.531	2.3	2.8	2.0	66.8	26.1
16.0	6.720	1.945	1.370	38.174	59.556	11.3	3.3	2.3	64.1	19.0
16.2	6.733	1.948	1.368	40.416	61.506	10.9	3.2	2.2	65.7	18.0
16.4	13.441	2.559	1.345	32.186	50.705	26.5	5.0	2.7	63.5	2.3
16.6	8.547	1.205	1.348	44.910	65.488	13.1	1.8	2.1	68.6	14.4
16.8	8.491	1.821	1.518	45.659	64.598	13.1	2.8	2.3	70.7	11.1
17.0	0.464	1.225	0.539	13.698	26.825	1.7	4.6	2.0	51.1	40.6
17.2	0.697	1.642	0.502	10.654	22.403	3.1	7.3	2.2	47.6	39.8
17.4	0.511	1.283	0.389	9.893	23.273	2.2	5.5	1.7	42.5	48.1
17.6	0.484	1.310	0.427	9.132	21.533	2.2	6.1	2.0	42.4	47.3
17.8	0.544	1.451	0.364	6.088	20.663	2.6	7.0	1.8	29.5	59.1

付表3-13 吸着カチオン、C.E.C、吸着カチオン/C.E.C (ボーリングNo.1)

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	CEC (meq/100g)	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	other (%)
18.0m	0.476	1.481	0.407	6.737	15.370	3.1	9.6	2.6	43.8	40.9
18.2	0.489	1.316	0.409	8.982	17.106	2.9	7.7	2.4	52.5	34.5
18.4	0.783	1.673	0.987	14.222	31.175	2.5	5.4	3.2	45.6	43.3
18.6	0.502	1.231	0.383	6.738	17.110	2.9	7.2	2.2	39.4	48.3
18.8	0.535	1.508	0.703	6.809	13.630	3.9	11.1	5.2	50.0	29.8
19.0	0.444	1.289	0.457	5.240	12.760	3.5	10.1	3.6	41.1	41.7
19.2	0.404	1.466	0.220	5.501	20.880	1.9	7.0	1.1	26.3	63.7
19.4	1.199	1.583	0.337	18.076	39.280	3.1	4.0	0.9	46.0	46.0
19.6	2.090	2.175	0.479	29.865	52.880	4.0	4.1	0.9	56.5	34.5
19.8	1.466	1.611	0.389	24.364	48.000	3.0	3.4	0.8	50.8	42.0

付表3-14 吸着カチオン、C.E.C、吸着カチオン/C.E.C (ボーリングNo2)

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	C.E.C (meq/100g)	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	other (%)
0.0m	0.260	0.878	0.751	1.674	22.400	1.2	3.9	3.4	7.5	84.0
0.2	0.343	1.007	1.011	1.470	28.264	1.2	3.6	3.6	5.2	86.4
0.4	0.264	1.080	0.632	0.639	17.600	1.5	6.1	3.6	3.6	85.2
0.6	0.348	1.191	0.724	0.743	15.192	2.3	7.9	4.8	4.9	80.1
0.8	0.313	1.543	0.645	1.493	11.376	2.8	13.6	5.7	13.1	64.8
1.0	0.251	1.301	0.526	0.958	12.088	2.1	10.8	4.4	7.9	74.8
1.2	0.311	2.193	1.027	2.020	14.400	2.2	15.2	7.1	14.0	75.5
1.4	0.306	1.600	1.092	2.236	16.352	1.9	9.8	6.7	13.7	67.9
1.6	0.300	1.396	0.646	1.497	12.919	2.3	10.8	5.0	11.6	70.3
1.8	0.333	1.814	0.518	1.198	11.710	2.8	15.5	4.4	10.2	67.1
2.0	0.352	1.343	0.703	1.699	19.460	1.8	6.9	3.6	8.7	79.0
2.2	0.320	1.396	0.913	1.796	18.600	1.7	7.5	4.9	9.7	76.2
2.4	0.281	1.394	0.777	2.096	15.330	1.8	9.7	5.1	13.7	70.3
2.6	0.268	1.389	0.888	1.497	16.880	1.6	8.2	5.3	8.9	76.0
2.8	0.488	1.588	1.163	2.595	12.571	3.9	12.6	9.3	20.6	53.6

付表3-15 吸着カチオン、C.E.C、吸着カチオン/C.E.C (ボーリングNo2)

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	C.E.C (meq/100g)	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	other (%)
3.0m	0.551	1.737	0.909	2.165	11.718	4.7	14.8	7.8	18.5	54.2
3.2	0.424	2.078	0.842	1.946	12.741	3.3	16.3	6.6	15.3	58.5
3.4	0.417	1.928	0.695	1.727	11.369	3.7	17.0	6.1	15.2	58.0
3.6	0.360	1.775	0.949	2.376	12.230	2.9	14.2	8.0	22.1	52.8
3.8	0.523	1.737	0.976	2.700	12.834	2.0	8.2	4.7	14.4	70.7
4.0	0.344	1.407	0.803	2.467	17.125	2.0	8.2	4.7	11.9	70.7
4.2	0.303	1.677	0.587	2.065	17.287	1.8	9.7	3.4	12.5	73.2
4.4	0.300	2.166	0.701	1.693	17.368	1.7	9.7	4.0	12.5	72.1
4.6	0.276	1.696	0.765	2.375	16.387	1.7	10.3	4.7	14.5	68.8
4.8	0.305	1.875	0.842	2.168	16.468	1.9	11.4	5.1	13.2	68.4
5.0	0.391	1.828	2.474	5.979	20.812	1.9	8.3	11.9	28.8	49.2
5.2	0.470	1.811	2.357	5.389	18.681	2.5	9.7	12.6	22.8	46.4
5.4	0.385	1.534	1.098	2.799	12.375	3.1	10.1	9.8	22.6	54.4
5.6	0.359	1.308	1.826	4.394	12.538	2.8	12.2	8.8	22.3	53.9
5.8	0.333	1.536	1.123	3.391	15.812	2.3	8.3	11.5	27.8	50.1

付表3-16 吸着カチオン、C.E.C、吸着カチオン/C.E.C (ボーリングNo.2)

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	CEC (meg/100g)	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	other (%)
6.0m	0.333	1.536	1.123	3.391	15.901	2.1	9.7	7.1	21.3	59.8
6.2	0.457	1.987	1.629	5.389	19.013	2.4	10.5	8.6	28.3	50.2
6.4	0.620	2.056	1.752	5.391	21.420	2.9	9.6	8.2	25.2	54.1
6.6	0.509	1.638	1.839	5.591	21.915	2.3	7.5	8.4	25.5	56.3
6.8	0.619	2.440	1.900	6.085	21.503	2.9	11.3	8.8	28.3	48.7
7.0	0.345	1.673	2.048	7.882	26.003	1.3	6.4	7.9	30.3	54.1
7.2	0.294	1.446	1.234	4.192	19.500	1.5	7.4	6.3	21.5	63.3
7.4	0.352	1.377	1.024	3.196	18.503	1.9	7.4	5.5	17.3	67.9
7.6	0.378	1.515	1.160	4.094	15.281	2.5	9.9	7.6	26.8	53.2
7.8	0.365	1.220	1.542	4.888	15.855	2.3	7.7	9.7	30.8	49.5
8.0	0.293	1.185	0.814	3.293	14.013	2.1	8.5	5.8	23.5	60.1
8.2	0.450	1.811	0.679	2.395	12.329	3.6	14.7	5.5	19.4	56.8
8.4	0.326	1.220	0.716	2.398	12.593	2.6	9.8	5.7	19.2	62.3
8.6	0.378	1.254	0.925	2.897	12.163	3.1	10.3	7.6	23.8	55.2
8.8	0.506	1.728	1.122	3.921	20.696	2.4	8.3	5.4	18.9	65.0

付表3-17 吸着カチオン、C.E.C、吸着カチオン/C.E.C (ボーリングNo.2)

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	CEC (meg/100g)	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	other (%)
9.0m	0.458	1.050	0.740	3.009	15.891	2.9	6.6	4.6	18.9	67.0
9.2	0.701	1.387	0.752	3.179	19.698	3.6	7.0	3.8	16.1	69.5
9.4	0.526	1.268	0.625	2.661	20.361	2.6	6.2	3.1	13.1	75.0
9.6	9.458	1.447	0.627	2.405	21.449	2.1	6.7	2.9	11.2	77.1
9.8	0.620	1.368	0.714	2.664	26.790	2.3	5.1	2.7	9.9	80.0
10.0	0.732	1.477	0.692	3.936	16.985	4.3	8.7	4.1	23.2	59.7
10.2	0.517	1.266	0.679	4.940	15.458	3.3	8.2	4.4	32.0	52.1
10.4	0.545	1.414	0.529	3.384	13.570	4.0	10.4	3.9	26.5	50.8
10.6	0.646	1.878	0.527	3.565	13.430	3.2	6.2	2.7	16.5	71.4
10.8	0.588	1.139	0.489	3.022	18.283	3.2	6.2	2.7	16.5	71.4
11.0	0.947	1.730	0.526	3.293	22.708	4.2	7.6	2.3	14.5	71.4
11.2	0.561	1.611	0.481	3.825	20.990	2.7	7.7	2.3	18.2	69.1
11.4	0.717	1.462	0.691	5.988	21.740	3.3	6.7	3.2	27.5	59.3
11.6	0.535	1.159	0.483	3.323	22.172	2.4	5.2	2.2	15.0	75.2
11.8	0.509	1.017	0.485	3.241	22.960	2.2	4.4	2.1	14.1	77.2

付表3-18 吸着カチオン、C.E.C、吸着カチオン/C.E.C (ボーリングNo2)

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	C.E.C (meq/100g)	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	other (%)
12.0m	1.357	2.091	1.407	28.814	44.229	3.1	4.7	3.2	65.1	23.9
12.2	1.187	1.692	1.468	27.043	49.668	2.4	3.4	3.0	54.4	36.8
12.4	2.088	2.038	1.698	39.491	50.576	4.1	4.0	3.4	78.1	10.4
12.6	2.171	2.296	1.777	42.066	61.296	3.5	3.7	2.9	68.6	21.3
12.8	2.339	2.341	2.106	41.895	56.968	4.1	4.1	3.7	73.5	14.6
13.0	2.086	1.944	1.987	46.359	63.176	3.3	3.1	3.1	73.4	17.1
13.2	1.420	1.572	1.619	28.331	40.424	3.5	3.9	4.0	70.1	18.5
13.4	1.949	2.017	1.882	44.985	58.664	3.3	3.4	3.2	76.7	13.4
13.6	1.834	2.109	1.696	41.917	58.377	3.1	3.6	2.9	71.8	18.6
13.8	1.753	2.045	1.697	40.918	62.280	2.8	3.3	2.7	65.7	25.5
14.0	1.780	1.899	1.701	41.916	63.699	2.8	3.0	2.7	65.8	25.7
14.2	1.807	1.887	1.823	41.583	58.022	3.1	3.3	3.1	71.7	18.8
14.4	1.739	1.863	1.798	41.417	58.286	3.0	3.2	3.1	71.1	19.6
14.6	1.712	1.843	1.772	39.754	66.365	2.6	2.8	2.7	59.9	32.0
14.8	1.969	1.851	1.769	40.752	57.328	3.4	3.2	3.1	71.1	19.2

付表3-19 吸着カチオン、C.E.C、吸着カチオン/C.E.C (ボーリングNo2)

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	C.E.C (meq/100g)	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	other (%)
15.0m	1.241	2.497	0.676	36.927	48.063	2.6	5.2	1.4	76.8	14.0
15.2	2.023	2.049	1.186	37.259	48.419	4.2	4.2	2.4	77.0	12.2
15.4	1.888	1.871	1.058	33.932	44.503	4.2	4.2	2.4	76.2	13.0
15.6	2.077	1.903	1.097	37.109	48.245	4.3	3.9	2.3	76.9	12.6
15.8	1.699	1.768	0.944	33.050	44.859	3.8	3.9	2.1	73.7	16.5
16.0	0.705	1.251	0.370	16.902	27.416	2.6	4.6	1.3	61.7	29.8
16.2	0.809	2.118	0.531	27.204	40.487	2.0	5.2	1.3	67.2	24.3
16.4	0.757	1.603	0.568	22.213	32.677	2.3	4.9	1.7	68.0	23.1
16.6	0.913	1.615	0.469	20.379	41.939	2.2	3.9	1.1	48.6	44.2
16.8	0.339	0.994	0.372	6.070	21.058	1.6	4.7	1.8	28.8	63.1
17.0	0.548	1.193	0.383	9.484	27.594	2.0	4.3	1.4	34.4	57.9
17.2	0.553	1.225	0.306	10.658	21.757	2.5	5.6	1.4	49.0	41.5
17.4	0.823	1.035	0.381	9.622	23.554	3.5	4.4	1.6	40.9	49.6
17.6	0.485	1.058	0.332	7.735	19.821	2.4	5.3	1.7	39.0	56.4
17.8	0.620	1.229	0.335	8.933	19.959	3.1	6.2	1.7	44.8	44.2

付表3-20 吸着カチオン、C.E.C、吸着カチオン/C.E.C (ボーリングNo.2)

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	C.E.C (meq/100g)	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	other (%)
18.0m	1.996	2.022	9.395	29.608	43.689	4.6	4.6	0.9	67.8	22.1
18.2	1.726	1.974	9.459	30.107	44.944	3.8	4.4	1.0	67.0	23.8
18.4	2.140	2.194	0.568	30.584	53.746	4.0	4.1	1.1	56.9	33.9
18.6	2.062	2.267	0.481	32.177	50.489	4.1	4.5	1.0	63.7	26.7
18.8	2.440	2.371	0.543	35.413	57.550	4.2	4.1	0.9	61.5	29.3
19.0	2.505	2.259	0.716	42.656	66.959	3.7	3.4	1.1	63.7	28.1
19.2	2.479	1.887	0.691	36.057	55.363	4.5	3.4	1.2	65.1	25.8
19.4	3.562	1.784	0.901	34.689	59.714	6.0	3.0	1.5	58.1	31.4
19.6	3.509	1.876	0.514	35.185	47.278	7.4	4.0	1.1	74.4	13.1
19.8	3.270	1.252	0.539	33.991	48.782	6.7	2.6	1.1	69.7	19.9
20.0	1.061	1.541	0.452	18.493	28.236	3.8	5.5	1.6	65.5	23.6
20.2	2.096	1.607	0.439	25.611	50.102	4.2	3.2	0.9	51.1	32.7
20.4	2.527	1.806	0.502	29.457	46.894	5.4	3.9	1.1	62.8	26.8
20.6	3.317	1.307	0.514	42.549	61.592	5.4	2.1	0.8	69.1	15.1
20.8	1.853	1.995	0.506	28.427	45.744	4.1	4.4	1.1	62.1	28.3

付表3-21 吸着カチオン、C.E.C、吸着カチオン/C.E.C (ボーリングNo.2)

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	C.E.C (meq/100g)	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	other (%)
21.0m	1.566	2.091	0.543	25.753	41.816	3.7	5.0	1.3	61.6	28.4
21.2	1.201	1.112	0.358	22.536	33.960	3.5	3.3	1.1	66.4	25.7
21.4	1.592	2.125	0.361	27.171	53.400	3.0	4.0	0.7	50.9	41.4
21.6	1.122	1.477	0.691	18.028	33.376	3.4	4.4	2.1	54.0	36.1
21.8	0.718	1.274	0.543	9.978	27.680	2.6	4.6	2.0	36.0	54.8
22.0	0.418	0.974	0.247	5.651	13.936	3.0	7.0	1.8	40.5	47.7
22.2	0.391	0.825	0.222	5.487	16.096	2.4	5.1	1.4	34.1	57.0
22.4	0.679	0.982	0.185	5.491	15.016	4.5	6.5	1.2	36.6	51.2
22.6	0.548	1.017	0.226	5.988	14.920	3.7	6.8	1.5	40.1	47.9
22.8	0.677	0.794	0.246	6.819	15.312	4.4	5.2	1.6	44.5	44.3
23.0	0.470	0.925	0.234	5.404	17.280	2.7	5.4	1.4	31.3	59.2
23.2	0.782	0.912	0.406	7.554	28.423	2.8	3.2	1.4	26.6	66.0
23.4	0.908	1.346	0.286	10.289	28.059	3.2	4.8	1.0	36.7	54.3
23.6	0.467	0.820	0.155	6.194	24.413	1.9	3.4	0.6	25.4	68.7
23.8	0.669	0.834	0.157	7.879	34.252	2.0	2.4	0.5	23.0	72.1

付表3-22 吸着カチオン、C.E.C、吸着カチオン/C.E.C (ボーリングNo.2)

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	C.E.C (meq/100g)	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	other (%)
24.0m	0.290	0.864	0.158	4.906	23.871	1.2	3.6	0.7	20.6	73.9
24.2	0.293	0.823	0.161	3.936	25.490	1.1	3.2	0.6	15.4	79.7
24.4	0.496	1.070	0.321	6.737	20.226	2.5	5.3	1.6	33.3	57.3
24.6	0.300	0.901	0.222	3.743	14.761	2.0	6.1	1.5	25.4	65.0
24.8	0.326	0.890	0.173	3.825	15.125	2.2	5.9	1.1	25.3	65.5